



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**OPTIMITZACIÓ EN LA PLANIFICACIÓ I OPERACIÓ DELS
AGREGADORS DE RECURSOS ENERGÈTICS DISTRIBUÏTS AMB
PARTICIPACIÓ EN EL MERCAT ELÈCTRIC**



Memòria i Annexos

Autor:	Anna Hernández Marsal
Director:	Maria Elena Martin Cañadas
Convocatòria:	Juny 2019

Resum

En el marc de l'Acord de París, sorgeix la necessitat d'un canvi en el sistema elèctric tradicional recolzat per la publicació de noves directrius i legislacions a nivell mundial, europeu i espanyol, a favor de la lluita contra el canvi climàtic, mitjançant una transició energètica transversal.

Els sistemes alternatius proposats es basen en la implementació de tecnologies més sostenibles amb el medi ambient, basades en la generació amb fonts renovables, els sistemes d'emmagatzematge i la gestió de la demanda final d'energia elèctrica dels consumidors. Aquestes noves tecnologies afavoreixen que el sistema elèctric sigui més proper a la població, amb l'aparició de nous conceptes com la democratització de l'energia. Dins d'aquest context sorgeix un nou agent en el Sistema Elèctric Espanyol, l'Agregador de Demanda o de Recursos Energètics Distribuïts.

El principal objectiu del projecte es basa en la modelització i posterior optimització d'un sistema Agregador de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el Mercat Elèctric. El model es basa en la formulació d'un conjunt de paràmetres, variables i restriccions per assolir la optimització plantejada en base a una funció objectiu, que en aquest cas consisteix en la minimització dels costos econòmics del sistema.

Els resultats del model ofereixen una anàlisi general de les diferents propostes de planificació d'Agregadors de diferents magnituds i els costos que se'n deriven. Altrament, es realitza una anàlisi més específica de les diferents tecnologies i eines integrants del sistema, prenent especial importància el concepte de Gestió de la Demanda de l'Agregador.

Resumen

En el marco del Acuerdo de París, surge la necesidad de un cambio en el sistema eléctrico tradicional apoyado por la publicación de nuevas directrices y legislaciones a nivel mundial, europeo y español, a favor de la lucha contra el cambio climático, mediante una transición energética transversal.

Los sistemas alternativos propuestos se basan en la implementación de tecnologías más sostenibles con el medio ambiente, basadas en la generación con fuentes renovables, los sistemas de almacenamiento y la gestión de la demanda final de energía eléctrica de los consumidores. Estas nuevas tecnologías favorecen que el sistema eléctrico sea más cercano a la población, con la aparición de nuevos conceptos como la democratización de la energía. Dentro de este contexto surge un nuevo agente en el Sistema Eléctrico Español, el Agregador de Demanda o de Recursos Energéticos Distribuidos.

El principal objetivo del proyecto se basa en la modelización y posterior optimización de un sistema Agregador de Recursos Energéticos Distribuidos con participación en el Mercado Eléctrico. El modelo se basa en la formulación de un conjunto de parámetros, variables y restricciones para alcanzar la optimización planteada en base a una función objetivo, que en este caso consiste en la minimización de los costes económicos del sistema.

Los resultados del modelo ofrecen un análisis general de las diferentes propuestas de planificación de Agregadores de diferentes magnitudes y los costes que se derivan. De lo contrario, se realiza un análisis más específico de las diferentes tecnologías y herramientas integrantes del sistema, tomando especial importancia el concepto de Gestión de la Demanda del Agregador.

Abstract

Within the framework of the Paris Agreement, there is a need for a change in the traditional electricity system supported by the publication of new guidelines and legislations, in favour of the fight against climate change, through an energy transition cross.

The alternative systems proposed are based on the implementation of more sustainable technologies with the environment, based on generation with renewable sources, storage systems and the management of consumers' final demand for electricity. These new technologies make that the electrical system is closer to the population, with the appearance of new concepts such as the democratization of energy. Within this context, a new agent emerges in the Spanish Electric System, the Demand Aggregator or Distributed Energy Resources Aggregator.

The main objective of the project is based on the modelling and subsequent optimization of an Distributed Energy Resource Aggregator system with participation in the Electricity Market. The model is based on the formulation of a set of parameters, variables and restrictions to achieve the optimization proposed based on an objective function, which in this case consists of minimizing the economic costs of the system.

The results of the model offer a general analysis of the different planning proposals for Aggregators of different magnitudes and the costs that are derived. Otherwise, a more specific analysis is made of the different technologies and tools that make up the system, with the Aggregate Demand Management concept taking special importance.



Agraïments

Agrair a l'Elena Martín com a directora del TFG el suport i l'interès mostrat en el tema des del principi.

A la meva primera família, a la segona família i als amics per ser un suport incondicional en tot el procés.

I als meus companys d'*Enertika* i *Wattabit* per l'empatia, l'ajuda i els ànims.





Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
1. INTRODUCCIÓ	3
1.1. Objectius del treball	4
1.2. Abast del treball	5
2. EL SISTEMA ELÈCTRIC ESPANYOL	6
2.1. Estructura del Sistema Elèctric Espanyol	8
2.1.1. Producció d'energia elèctrica	9
2.1.2. Transport d'energia elèctrica	10
2.1.3. Distribució d'energia elèctrica	10
2.1.4. Comercialització d'energia elèctrica	11
2.2. Funcionament del sistema	12
3. TRANSICIÓ ENERGÈTICA	14
3.1. Generació Distribuïda i Gestió de la Demanda	15
3.2. Agregador de Demanda	16
4. MODELITZACIÓ D'UN AGREGADOR DE RECURSOS ENERGÈTICS DISTRIBUÏTS AMB PARTICIPACIÓ EN EL MERCAT ELÈCTRIC	17
4.1. Metodologia: AIMMS	18
4.1.1. Definició de sets i paràmetres generals	19
4.2. Formulació de l'objectiu	22
4.3. Recursos Energètics Distribuïts	24
4.3.1. Emmagatzematge elèctric	24
4.3.2. Demand Response	26
4.3.3. Producció elèctrica instal·lació Fotovoltaica	27
4.3.4. Producció tèrmica instal·lació Bomba de Calor	29
4.4. Balanços energètics	30
4.4.1. Balanç d'energia tèrmica	30
4.4.2. Balanç d'energia elèctrica	30

4.5.	Participació en el mercat elèctric	31
4.5.1.	Corbes de demanda residual	31
4.5.2.	Mètode de definició del cost elèctric del sistema	33
4.5.3.	Restriccions	34
5.	PRESENTACIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS	36
5.1.	Resultats generals de planificació i operació del Model.....	36
5.1.1.	Anàlisi dels costos associats al Model	38
5.1.2.	Comparativa de costos amb un sistema energètic convencional.....	40
5.2.	Resultats en l'operació dels Recursos Energètics Distribuïts.....	41
5.2.1.	Balanç d'energia elèctrica	41
5.2.2.	Balanç d'energia tèrmica	43
5.2.3.	Emmagatzematge elèctric	44
5.2.4.	Gestió de la Demanda.....	45
6.	ANÀLISI DE L'IMPACTE DEL PROJECTE	49
	CONCLUSIONS	50
	PRESSUPOST	51
	BIBLIOGRAFIA	52
	ANNEX A. DADES D'ENTRADA DEL MODEL	55

Índex de Figures

FIGURA 2.1. ESQUEMA DEL SISTEMA ELÈCTRIC NACIONAL. [8]	9
FIGURA 2.2. DISTRIBUCIÓ GEOGRÀFICA DE LES PRINCIPALS EMPRESES DISTRIBUÏDORES. [9]	11
FIGURA 2.3. CORBA AGREGADA D'OFERTA I DEMANDA.	12
FIGURA 4.1. DIAGRAMA DE BLOCS DEL MODEL D'OPTIMITZACIÓ PROPOSAT [3].....	17
FIGURA 4.2. LOGOTIP DE LA COMPANYIA DESENVOLUPADORA AIMMS. [16]	18
FIGURA 4.3. CORBES CARACTERÍSTIQUES DEMANDA ELÈCTRICA – HIVERN	21
FIGURA 4.4. CORBES CARACTERÍSTIQUES DEMANDA ELÈCTRICA – ESTIU.....	21
FIGURA 4.5. DEMANDA TÈRMICA MENSUAL.	21
FIGURA 4.6. CODI RESTRICCIÓ I DELS SISTEMES DE BATERIES.	25
FIGURA 4.7. CODI RESTRICCIÓ II DELS SISTEMES DE BATERIES.	25
FIGURA 4.8. CODI RESTRICCIÓ III DELS SISTEMES DE BATERIES.	25
FIGURA 4.9. CODI RESTRICCIÓ IV DELS SISTEMES DE BATERIES.	26
FIGURA 4.10. CODI RESTRICCIÓ V DELS SISTEMES DE BATERIES.	26
FIGURA 4.11. CODI RESTRICCIÓ VI DELS SISTEMES DE BATERIES.	26
FIGURA 4.12. CODI RESTRICCIÓ I DEL SISTEMA DE DEMAND RESPONSE.	27
FIGURA 4.13. CODI RESTRICCIÓ II DEL SISTEMA DE DEMAND RESPONSE.	27
FIGURA 4.14. CODI RESTRICCIÓ I DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓ FOTOVOLTAICA.	28
FIGURA 4.15. CODI RESTRICCIÓ II DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓ FOTOVOLTAICA.	28
FIGURA 4.16. CODI RESTRICCIÓ I DEL SISTEMA DE BOMBES DE CALOR.	29
FIGURA 4.17. CODI RESTRICCIÓ II DEL SISTEMA DE BOMBES DE CALOR.	29
FIGURA 4.18. CORBES RESIDUALS DE DEMANDA DE GENER A L'HORA 10. [3].....	31
FIGURA 4.19. CORBA DE COST DE L'ENERGIA DE GENER A L'HORA 8. [3]	32
FIGURA 4.20. CORBES EXTRAPOLADES DE COST DE L'ENERGIA A L'HORA 8.	33
FIGURA 4.21. CODI RESTRICCIÓ I DINS LA DEFINICIÓ DEL COST ELÈCTRIC DEL SISTEMA.	34
FIGURA 4.22. CODI RESTRICCIÓ II DINS LA DEFINICIÓ DEL COST ELÈCTRIC DEL SISTEMA.	34
FIGURA 4.23. CODI RESTRICCIÓ III DINS LA DEFINICIÓ DEL COST ELÈCTRIC DEL SISTEMA.	35
FIGURA 4.24. CODI RESTRICCIÓ I DE DEFINICIÓ DE LA POTÈNCIA CONTRACTADA.....	35
FIGURA 4.25. CODI RESTRICCIÓ I DE DEFINICIÓ DE LA POTÈNCIA CONTRACTADA.....	35
FIGURA 5.1. EVOLUCIÓ INSTAL·LACIÓ DE RECURSOS SEGONS LA QUOTA DE MERCAT DE L'AGREGADOR.	36
FIGURA 5.2. EVOLUCIÓ DELS COSTOS TOTALS DEL SISTEMA EN BASE A LA QUOTA DE MERCAT DE L'AGREGADOR.	38
FIGURA 5.3. DISTRIBUCIÓ DE COSTOS DE L'AGREGADOR DE 0,04 M DE CLIENTS.	39
FIGURA 5.4. DISTRIBUCIÓ DE COSTOS DE L'AGREGADOR DE 8 M DE CLIENTS.	39
FIGURA 5.5. DISTRIBUCIÓ DE COSTOS DE L'AGREGADOR SENSE RECURSOS ENERGÈTICS DISTRIBUÏTS.	40
FIGURA 5.6. BALANÇ ENERGIA ELÈCTRICA PER AL CLIENT DE TIPUS 1 EL MES DE GENER EN L'AGREGADOR DE 0,04M.	41
FIGURA 5.7. BALANÇ ENERGIA ELÈCTRICA PER AL CLIENT DE TIPUS 3 EL MES DE JULIOL EN L'AGREGADOR DE 2M.....	42
FIGURA 5.8. BALANÇ ELÈCTRIC PER AL CLIENT DE TIPUS 1 EL MES DE GENER EN L'AGREGADOR DE 8M.	42
FIGURA 5.9. BALANÇ ELÈCTRIC PER AL CLIENT DE TIPUS 4 EL MES D'OCTUBRE EN L'AGREGADOR DE 8M.	42
FIGURA 5.10. DISTRIBUCIÓ DE LA DEMANDA D'ENERGIA TÈRMICA SEGONS TECNOLOGIA EN ELS AGREGADOR DE 0,04M, 2M I 8M, A ESQUERRE, CENTRE I DRETA RESPECTIVAMENT.	43

FIGURA 5.11. BALANÇ MENSUAL D'ENERGIA TÈRMICA PER AL CLIENT DE TIPUS 1 L'AGREGADOR DE 8M.....	43
FIGURA 5.12. BALANÇ ENERGÈTIC BATERIES PER AL CLIENT DE TIPUS 1 ENTRE GENER I JUNY EN L'AGREGADOR DE 8M.	44
FIGURA 5.13. BALANÇ ENERGÈTIC BATERIES PER AL CLIENT DE TIPUS 1 ENTRE GENER I JUNY EN L'AGREGADOR DE 8M.	44
FIGURA 5.14. GESTIÓ DE LA DEMANDA DE GENER EN L'AGREGADOR DE 0,04M.....	45
FIGURA 5.15. GESTIÓ DE LA DEMANDA D'OCTUBRE EN L'AGREGADOR DE 8M.	45
FIGURA 5.16. GESTIÓ DE LA DEMANDA D'OCTUBRE EN L'AGREGADOR DE 1M.	46
FIGURA 5.17. VARIACIÓ DE LA DEMANDA ORIGINAL TOTAL EN L'AGREGADOR DE 0,04M.	47
FIGURA 5.18 VARIACIÓ DE LA DEMANDA ORIGINAL TOTAL EN L'AGREGADOR DE 1M.	47
FIGURA 5.19. VARIACIÓ DE LA DEMANDA ORIGINAL TOTAL EN L'AGREGADOR DE 4M.	48

Índex de Taules

TAULA 2.1. RESUM DEL MIX DE POTÈNCIA INSTAL·LADA AL SISTEMA ELÈCTRIC ESPANYOL SEGONS TECNOLOGIA. [8]	9
TAULA 4.1. DEFINICIÓ DELS SETS PRINCIPALS DEL MODEL.	19
TAULA 4.2. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES GENERALS DEL MODEL.	20
TAULA 4.3. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES DE DEMANDA ENERGÈTICA DEL MODEL.	20
TAULA 4.4. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES ESPECÍFICS DEL SISTEMA DE BATERIES.	24
TAULA 4.5. DEFINICIÓ DE LES VARIABLES DE DECISIÓ ESPECÍFIQUES DELS SISTEMES DE BATERIES.	25
TAULA 4.6. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES ESPECÍFICS DELS SISTEMES DE RESPOSTA A LA DEMANDA.	27
TAULA 4.7. DEFINICIÓ DE LES VARIABLES DE DECISIÓ ESPECÍFIQUES DELS SISTEMES DE RESPOSTA A LA DEMANDA.	27
TAULA 4.8. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES ESPECÍFICS DELS SISTEMES DE PRODUCCIÓ FOTOVOLTAICA.	28
TAULA 4.9. DEFINICIÓ DE LES VARIABLES DE DECISIÓ ESPECÍFIQUES DELS SISTEMES DE PRODUCCIÓ FOTOVOLTAICA.	28
TAULA 4.10. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES ESPECÍFICS DE LES INSTAL·LACIONS DE BOMBES DE CALOR.	29
TAULA 4.11. DEFINICIÓ DE LES VARIABLES DE DECISIÓ ESPECÍFIQUES DE LES INSTAL·LACIONS DE BOMBES DE CALOR.	29
TAULA 4.12. DEFINICIÓ DELS SETS AUXILIAR PER A LA DEFINICIÓ DE LES CORBES DE COST DE L'ENERGIA.	32
TAULA 4.13. DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES ESPECÍFICS DE LES CORBES DE COST DE L'ENERGIA.	32
TAULA 4.14. DEFINICIÓ DE LES VARIABLES AUXILIARS PER A LA DEFINICIÓ DEL COST ELÈCTRIC DEL SISTEMA.	33
TAULA 5.1. PLANIFICACIÓ D'INSTAL·LACIÓ DE RECURSOS SEGONS EL NOMBRE DE CLIENTS DE L'AGREGADOR.	36
TAULA 5.2. PLANIFICACIÓ D'INSTAL·LACIÓ DE BATERIES SEGONS CLIENT I ESCALA DE L'AGREGADOR.	37
TAULA 5.3. COSTOS TOTALS DEL SISTEMA SEGONS EL NOMBRE DE CLIENTS DE L'AGREGADOR.	38
TAULA 5.4. COMPARATIU COSTOS TOTALS AMB UN SISTEMA ANÀLEG SENSE RECURSOS ENERGÈTICS DISTRIBUÏTS.	40
TAULA 5.5. CAPACITAT D'AJUST DELS AGREGADORS.	46
TAULA 7.1. PRESSUPOST.	51
TAULA 7.2. DESGLOSSAMENT CONCEPTE D'ENGINYERIA.	51



1. Introducció

L'energia és un bé essencial per a la societat, imprescindible per cobrir les necessitats bàsiques de la població, i un vector principal en el procés productiu de les empreses.

El Consell de Ministres, a proposta del Ministeri per a la Transició Ecològica, va fer públic el passat 22 de febrer de 2019 l'Avantprojecte de Llei de Canvi Climàtic i Transició Energètica [1].

L'avantprojecte de la Llei pretén definir les línies d'acció per a la creació d'un marc normatiu que faciliti i orienti la descarbonització de l'economia per a l'any 2050, tal com estableixen les directrius de la Unió Europea i el compromís adquirit en l'Acord de París, amb mesures que defineixen una transició energètica justa i adequada a les exigències climàtiques.

L'Acord de París [2], dins el Conveni Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic, estableix en el seu article segon les següents directrius i objectius a escala mundial:

- Limitació de l'augment de la temperatura mitjana mundial 2 °C per sota els nivells de temperatura anteriors a la industrialització. Addicionalment, es considera que si s'aconsegueix limitar l'augment de la temperatura mitjana mundial a 1,5 °C, es reduirien considerablement els efectes del canvi climàtic [2].
- Augment de la capacitat global d'adaptació als efectes del canvi climàtic, a través del suport i la cooperació internacional.
- Promoció del desenvolupament amb baixes emissions de gasos d'efecte hivernacle.
- Compatibilitzar els fluxos financers de l'economia amb el desenvolupament dels objectius proposats dins l'Acord.

Els anys 2030 i 2050 s'estableixen com a límits temporals de referència per al compliment dels objectius de l'Acord de París. L'objectiu principal d'aquest resideix en la reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, mitjançant l'aplicació de mesures com la introducció massiva d'energies renovables i l'ús més eficient de l'energia en tots els sectors de la societat.

Els objectius proposats per al 2030 són:

- Reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle com a mínim un 20% respecte als valors registrats el 1990.
- Augmentar fins a un 70% la generació d'electricitat a base de renovables.
- Assegurar un 35% d'energia provinent de fonts renovables en el consum final d'energia.
- Incrementar fins al 35% l'eficiència energètica, respecte a l'escenari tendencial de referència.

Més enllà, els objectius proposats per al 2050 són:

- Reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle com a mínim un 90% respecte als valors registrats el 1990.
- Un sistema elèctric 100% renovable.

Les mesures proposades en l'Avantprojecte de Llei de Canvi Climàtic i Transició Energètica se centren en l'impuls definitiu a la generació a partir d'energies renovables i el foment dels combustibles alternatius i de la mobilitat sostenible, partint d'un sistema públic d'incentius econòmics i un marc regulador que fomenti l'estabilitat dins el sistema financer i d'inversió.

El context mundial de creació de mesures de lluita contra el canvi climàtic ha suposat un impacte positiu en el desenvolupament de noves tecnologies. S'ha generat un nou escenari d'incentivació de plans de recerca i investigació dins el sector de la gestió de l'energia, per tal de trobar solucions als reptes plantejats dins l'Acord de París i lluitar contra el canvi climàtic.

1.1. Objectius del treball

Dins d'aquest context de transició energètica, i com a Treball Final del Grau en Enginyeria de l'Energia, es proposa la creació d'un model d'optimització econòmica d'un Agregador de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el Mercat Elèctric.

El principal objectiu rau en la minimització dels costos resultants de l'operació d'Agregadors de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el Mercat Elèctric. L'execució del model ha de proporcionar un resultat òptim de planificació i operació dels sistemes energètics plantejats, considerant les transaccions d'energia amb la resta del Sistema Elèctric a Espanya i la participació de l'Agregador en el Mercat, així com els costos d'inversió i operació per a la implementació de les diferents tecnologies.

Els objectius derivats de la modelització de l'Agregador serien l'estudi de la viabilitat d'implementació de nous esquemes energètics dins el sistema actual, com a part de la transició energètica que s'està fomentant a nivell mundial. A més, s'analitza l'impacte de l'agregació de consumidors dins el subjecte d'Agregador de mercat, en funció de la seva mida, tant per al sistema elèctric com per als mateixos consumidors.

1.2. Abast del treball

L'abast del treball es concentra en la proposta d'un model d'optimització matemàtica d'un sistema agregador de recursos energètics distribuïts amb participació en el mercat elèctric.

El model proposat és escalable segons la mida de l'agregador i admet la formulació de diferents casos a partir de modificacions en les dades de partida del sistema. Un cop executat, se n'extreuen un seguit de conclusions generals, sobre la viabilitat i l'impacte d'aquests nous agents sobre el model energètic tradicional.

Com a contextualització del model, es considera la introducció de conceptes teòrics relacionats amb el funcionament del Sistema Elèctric a Espanya i la Transició Energètica, amb la consegüent aparició de nous agents, sistemes i tecnologies dins del context de transició energètica del país.

No entra dins l'abast del projecte la realització d'un estudi exhaustiu sobre el funcionament dels Mercats de l'Electricitat, més enllà d'una contextualització teòrica al respecte que ajudi a la millor comprensió del model d'optimització plantejat.

L'esquema de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts es basa en el model plantejat per un article de referència [3], publicat l'any 2016 per part de l'Institut d'Investigació Tecnològica (IIT) de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ICA) de la Universitat Pontifícia Comillas de Madrid, sobre l'agregació de recursos distribuïts d'energia i el seu impacte sobre el preu del mercat elèctric.

La modelització de l'Agregador i l'optimització del mateix s'ha realitzat dins l'entorn de desenvolupament de la plataforma AIMMS, la qual ofereix un entorn integral de creació d'aplicacions avançades de planificació i optimització d'operacions i de recursos. No es considera dins l'abast del projecte la base de programació i optimització matemàtica utilitzada per la plataforma.

2. El Sistema Elèctric Espanyol

Un sistema elèctric es defineix com el conjunt d'instal·lacions, conductors i equips necessaris per a la generació, el transport i la distribució de l'energia elèctrica [4].

Des de finals del segle XIX, i sobretot al llarg del segle XX, l'avanç tecnològic de la societat ha anat acompanyat del creixement dels sistemes elèctrics, fins al punt de considerar el consum d'energia elèctrica com un dels indicadors més clars del grau de desenvolupament d'un país.

A principis del segle XX, el desenvolupament del sistema elèctric a Espanya es caracteritzava per estar configurat per un gran nombre de petites empreses i sistemes a escala local, creats per al subministrament d'electricitat a les ciutats i les zones industrialitzades. El 1944, arran de l'estancament provocat pel context històric de l'època, les principals empreses elèctriques espanyoles van fundar UNESA, *Unidad Eléctrica S.A.*, per tal de coordinar l'explotació dels recursos elèctrics disponibles i promoure el desenvolupament del sistema elèctric nacional mitjançant la seva interconnexió, la construcció de grans centrals hidroelèctriques i tèrmiques, i el desenvolupament de la xarxa elèctrica.

Durant la major part del segle XX, el sector elèctric a Espanya estava format per un conjunt reduït d'empreses privades que integraven la generació, el transport, la distribució i la comercialització de l'energia. El sistema era gestionat independentment per cada una d'aquestes empreses, poden establir, o no, acords bilaterals de compra i venda d'energia entre elles.

Posteriorment, a la dècada dels vuitanta del segle XX, el sector elèctric va patir greus problemes estructurals i financers [5] protagonitzats per:

- El dimensionament inadequat de l'estructura generadora.
- Un baix nivell d'ingressos per part de les companyies elèctriques.
- El retard en la posada en servei de les centrals nuclears en construcció.
- Un deute elevat per una alta inversió en generació, i la revaloració d'aquest en moneda estrangera (principalment en dòlars).

En conseqüència, el govern de l'estat espanyol i les empreses elèctriques van negociar conjuntament un paquet de mesures per tal de buscar solucions als problemes anteriors i donar estabilitat al sector elèctric.

Com ha resultat d'aquestes reunions cal destacar l'aprovació el 1984 del *Protocolo de acuerdo entre el gobierno y el sector eléctrico* (1983), el *Plan Energético Nacional* (1983-1992), o la publicació del Real Decret 1538/1987 conegut amb el nom de *Marco Legal Estable*. El Real Decret 1538/1987 assegurava la viabilitat de les empreses elèctriques a canvi d'una fort intervenció pública en la seva gestió.

És a partir d'aquell moment quan el Sector Elèctric Espanyol passa a concebre's com un servei públic. *Red Eléctrica de España S.A. (REE)* és proclamada com a propietària de la xarxa de transport d'alta tensió, la generació se centralitza i tot el sistema passa a gestionar-se com una única empresa, la qual s'encarrega posteriorment de distribuir els costos i els beneficis entre les empreses.

No és fins a l'any 1996, quan es publica una Directiva Europea amb el principal objectiu de liberalitzar els mercats de l'energia elèctrica dins la Unió Europea, caracteritzats fins al moment per grans monopolis empresarials. Consegüentment, a Espanya, sorgeix la *Ley del Sector Eléctrico* de 1997 la qual introdueix un canvi radical dins el sector i l'inici del procés progressiu de liberalització del sector.

Alguns dels elements fonamentals de la Llei 54/1997 del Sector Elèctric [6] van ser:

- Regulació de les activitats destinades al subministrament d'energia elèctrica, adoptant un model liberalitzat basat en els principis d'objectivitat, transparència i lliure competència.
- Reconeixement de la lliure iniciativa empresarial, considerant dos nivells d'activitats: activitats lliures (producció i comercialització) i activitats regulades (transport, distribució i coordinació econòmica i tècnica per al funcionament del sistema). Es prohibeix la tradicional integració vertical de negoci que configuraven les empreses elèctriques fins al moment.
- Substitució de l'antiga qualificació del sector com a servei públic, per una garantia de subministrament a tots els consumidors dins el territori nacional. L'accés a l'energia elèctrica passa a considerar-se un servei essencial.
- Establiment d'un mercat organitzat de negociació de l'energia. La retribució per l'activitat de producció es basa en l'organització d'un mercat majorista i s'anul·la el principi de reconeixement de costos.
- Reducció de la intervenció pública en la gestió del sistema.
- Reconeixement de l'activitat de comercialització d'energia elèctrica com una activitat independent de la resta d'activitats destinades al subministrament. El marc normatiu va permetre la total llibertat de contractació i elecció per part dels consumidors.
- Adjudicació de la responsabilitat de gestió econòmica i tècnica del sistema elèctric a societats mercantils i privades.

Per contra, durant els anys posteriors a la liberalització del Sistema Elèctric Espanyol es van anar produint canvis fonamentals dins el sector, que provocaren la contínua necessitat d'actuació de l'aparell legislador de l'estat. Destaquen l'alt nivell d'inversió requerida en xarxes de transport i distribució, la instal·lació de tecnologies de generació elèctrica renovable, l'evolució del mercat amb l'aparició de nous agent i l'augment de la complexitat de les ofertes al Mercat.

De manera paral·lela, durant el període posterior a la Llei de 1997, es van acumular desequilibris anuals entre els ingressos i els costos del sistema, que acabaren provocant l'aparició d'un dèficit estructural

de deu mil milions anuals, tot i l'augment del preu de l'electricitat molt per sobre de la mitja de preu de la Unió Europea. El deute acumulat l'any 2013 superava els vint-i-sis mil milions d'euros i la no correcció del desequilibri posava en perill el sistema elèctric espanyol.

La no sostenibilitat econòmica del sistema, juntament amb la contínua evolució del Sector, va obligar a adaptar en nombroses ocasions la Llei 24/1997. Els continus canvis normatius van suposar una important distorsió en el funcionament normal del sistema i es va creure pertinent l'aprovació d'una reforma global del Sector per tal d'afavorir a l'estabilitat financera, tan necessària per a una activitat com la del Sector Elèctric.

Així doncs, la Llei 54/1997 va romandre vigent fins a la publicació de la nova Llei 24/2013, de 26 de desembre, del Sector Elèctric, vigent en l'actualitat.

Segons s'estableix en l'article 1.1. de la Llei 24/2013 [7]:

La presente ley tiene por objeto establecer la regulación del sector eléctrico con la finalidad de garantizar el suministro de energía eléctrica, y de adecuarlo a las necesidades de los consumidores en términos de seguridad, calidad, eficiencia, objetividad, transparencia y al mínimo coste.

La nova Llei del Sector reconeix la lliure iniciativa empresarial per al desenvolupament de les activitats destinades al subministrament d'energia elèctrica, considerant aquest com un servei d'interès econòmic general. Tanmateix, es regula que és competència del Govern i les Administracions Públiques regular i controlar les activitats destinades al subministrament d'energia elèctrica.

2.1. Estructura del Sistema Elèctric Espanyol

La Llei 24/2013 del Sector Elèctric defineix l'estructura i el funcionament de tot el Sistema Elèctric Espanyol. Concretament, és en l'article 1.2. [7] on es determina que les activitats destinades al subministrament d'energia elèctrica són la generació, el transport, la distribució, la comercialització, els intercanvis intracomunitaris i internacionals, i la gestió econòmica i tècnica del sistema elèctric.

El principal fi del Sistema Elèctric és garantir el subministrament energètic als consumidors, en les condicions adequades de seguretat i qualitat.

Tal com s'estableix en l'article 28 de la Llei 24/2013, el Sistema Elèctric Espanyol és gestionat i garantit per l'Operador del Mercat i l'Operador del Sistema.

- **L'Operador del Mercat**, *Operador del Mercado Español de Electricidad S.A. (OMEL)*, s'encarrega de l'operació econòmica del sistema mitjançant la gestió del mercat d'ofertes de compra i venda d'energia en el mercat diari i intradiari, així com de la liquidació final resultant.

- **L'Operador del Sistema, Red Eléctrica de España S.A. (REE)**, s'encarrega de garantir tècnicament la continuïtat, qualitat, seguretat i coordinació de les operacions de producció i transport fins a les xarxes de distribució. Tot assegurant les condicions de qualitat exigibles en aplicació de la normativa vigent sota els principis de transparència, objectivitat, independència i eficiència econòmica, tant a la península com als sistemes no peninsulars de Canàries, Balears, Ceuta i Melilla.

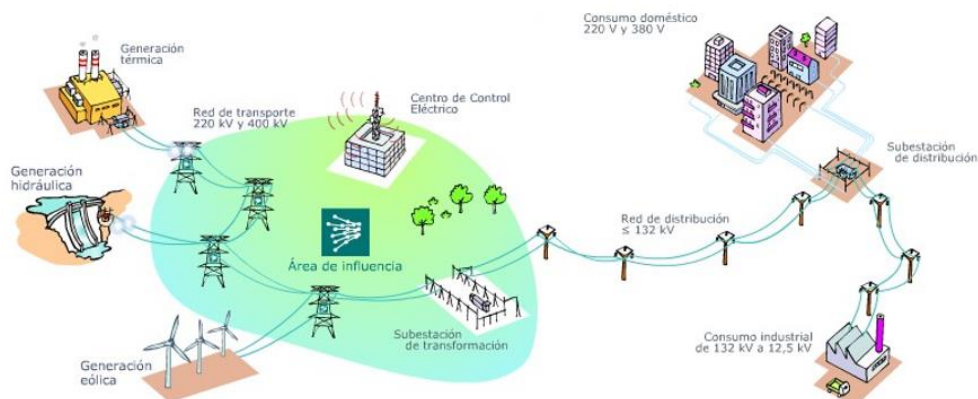


Figura 2.1. Esquema del sistema elèctric nacional. [8]

2.1.1. Producció d'energia elèctrica

Els productors d'energia elèctrica són els encarregats de la generació de l'energia dins el sistema elèctric, tot construint, operant i mantenint les instal·lacions de producció i les infraestructures pròpies de connexió a la xarxa de transport i distribució.

Taula 2.1. Resum del mix de potència instal·lada al sistema elèctric espanyol segons tecnologia. [8]

	2016	2017	2018	2019
Hidràulica	20.362 MW	20.359 MW	20.378 MW	20.378 MW
Nuclear	7.573 MW	7.117 MW	7.117 MW	7.117 MW
Carbó	10.004 MW	10.004 MW	10.030 MW	9.683 MW
Fuel + Gas	2.490 MW	2.490 MW	2.490 MW	2.490 MW
Cicle combinat	26.670 MW	26.670 MW	26.284 MW	26.284 MW
Hidroeòlica	11 MW	11 MW	11 MW	11 MW
Eòlica	23.050 MW	23.130 MW	23.507 MW	23.556 MW
Solar fotovoltaica	4.686 MW	4.688 MW	4.714 MW	4.817 MW
Solar tèrmica	2.304 MW	2.304 MW	2.304 MW	2.304 MW
Tèrmica renovable i altres renovables	858 MW	860 MW	865 MW	876 MW
Tèrmica no renovable i cogeneració	5.979 MW	5.814 MW	5.741 MW	5.707 MW
Residus no renovables	497 MW	497 MW	491 MW	491 MW
Residus renovables	162 MW	162 MW	162 MW	162 MW
TOTAL	104.647 MW	104.108 MW	104.094 MW	103.876 MW

Els productors han d'estar necessàriament inscrits i definits, respecte a les característiques pròpies de la instal·lació i la seva potència, en el registre administratiu d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica del Ministeri d'Indústria, Energia i Turisme per a poder participar en el mercat de producció. Així mateix, en el cas de les instal·lacions de producció amb fonts d'energia renovables, cogeneració i residus, cal incloure-les dins el registre de règim retributiu específic per tal de poder accedir al règim de retribució específica d'aquest tipus d'instal·lacions de producció.

2.1.2. Transport d'energia elèctrica

El transport consisteix en la transmissió d'energia elèctrica als diferents subjectes participants del sistema elèctric. És responsabilitat de l'activitat de transport la transmissió de l'energia elèctrica als punts requerits, així com la construcció, manteniment i operació de les instal·lacions de la xarxa de transport.

La xarxa de transport es divideix en la xarxa de transport primari i la de transport secundari.

- Xarxa de transport Primari: Constituïda per totes les instal·lacions de transport (línies, transformadors, etc.) que tenen tensions nominals iguals o superiors a 380 kV.
- Xarxa de transport Secundari: Constituïda per totes les instal·lacions de transport amb tensions nominals iguals o superior a 220 kV i inferiors a 380 kV. També s'inclouen les instal·lacions amb tensions nominals inferiors a 220 kV amb funcions de transport.

El transport és una activitat regulada i la propietat de la seva xarxa recau principalment en mans de l'operador del sistema. Red Eléctrica és responsable de l'operació en temps real de la xarxa de transport, així com de la coordinació del manteniment, el desenvolupament i l'ampliació de la xarxa de transport per garantir l'homogeneïtat i seguretat del sistema.

2.1.3. Distribució d'energia elèctrica

La distribució consisteix en la transmissió de l'energia elèctrica des de les xarxes de transport, o d'altres xarxes de distribució o generació connectada directament a la xarxa de distribució, fins als punts de consum amb la finalitat de subministrar l'energia als consumidors.

Les empreses distribuïdores són les encarregades de la gestió de les xarxes de distribució, formades per instal·lacions amb tensions nominals inferiors a 220 kV. Aquestes han de procurar oferir un servei regular i continu, amb uns nivells de qualitat adequats a la normativa vigent, i mantenir les xarxes de distribució elèctrica en condicions adequades.

Les empreses distribuïdores es caracteritzen per dividir-se territorialment segons les diferents zones geogràfiques d'actuació. Existeixen cinc grans distribuïdores en l'àmbit nacional: Endesa, Iberdrola, HC Energia - EDP, Unión Fenosa i EON.

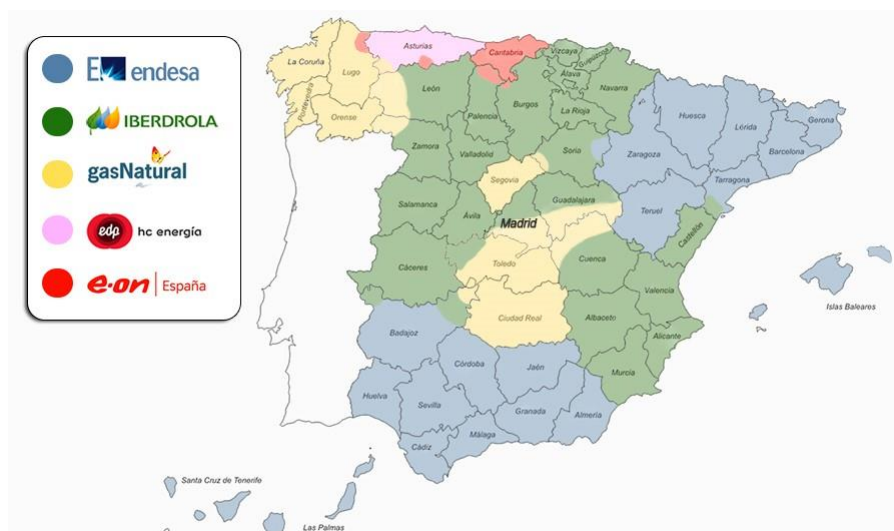


Figura 2.2. Distribució geogràfica de les principals empreses distribuïdores. [9]

A més a més, existeixen més de 300 distribuïdores independents amb mides més reduïdes. Totes aquestes empreses distribuïdores d'energia elèctrica han d'estar necessàriament inscrites dins el Registre Administratiu de Distribuïdors.

2.1.4. Comercialització d'energia elèctrica

L'activitat de comercialització es desenvolupa per part de les empreses comercialitzadores d'energia elèctrica. Mitjançant l'accés a les xarxes de transport o distribució, procuren la venda d'energia elèctrica als consumidors. És una activitat no regulada.

L'article 46 de la Llei del Sector Elèctric regula les obligacions i els drets de les empreses comercialitzadores en relació al subministrament d'energia [7], entre els quals destaquen l'accés a les xarxes de distribució i transport, el poder d'actuar com a subjectes de mercat en el mercat de producció d'electricitat i la gestió pròpia de la facturació, el cobrament i el pagament relacionats amb altres activitats del sector elèctric.

El llistat de les comercialitzadores actives, segons comunicui el Ministeri d'Indústria, Energia i Turisme, es publica a la pàgina web de La comissió Nacional dels Mercats i la Competència.

2.2. Funcionament del sistema

L'aprovació de la Llei 54/1997, del Sector Elèctric, va suposar, entre altres mesures, l'establiment d'un mercat organitzat de negociació de l'energia. La retribució de l'activitat de producció es va basar a partir d'aquell moment en l'organització d'un mercat majorista. Posteriorment, la Llei 24/2013 del Sector va suposar una millora en els processos de participació en el mercat de l'energia i una integració del mercat espanyol en els mercats elèctrics europeus.

Un dels principals objectius dins el sistema de subministrament elèctric és assegurar, al mínim cost possible, que la potència generada pels subjectes productors sigui igual a la potència consumida pel sistema.

L'Operador de Mercat, com a organisme responsable de l'operació econòmica del sistema, s'encarrega de la gestió del sistema mitjançant el mercat diari i el mercat intradiari de l'energia. En el mercat diari es gestionen les ofertes per a les 24 hores del dia següent, mentre que el mercat intradiari s'encarrega de cobrir els desajustos sorgits del mercat diari.

En grans trets, el mercat diari de l'energia funciona a partir d'un sistema de cassació entre les ofertes de venda d'energia, presentades pels productors d'energia, i les ofertes de compra realitzades per les comercialitzadores.

14/05/2019 - Curvas agregadas de oferta y demanda - Hora: 8

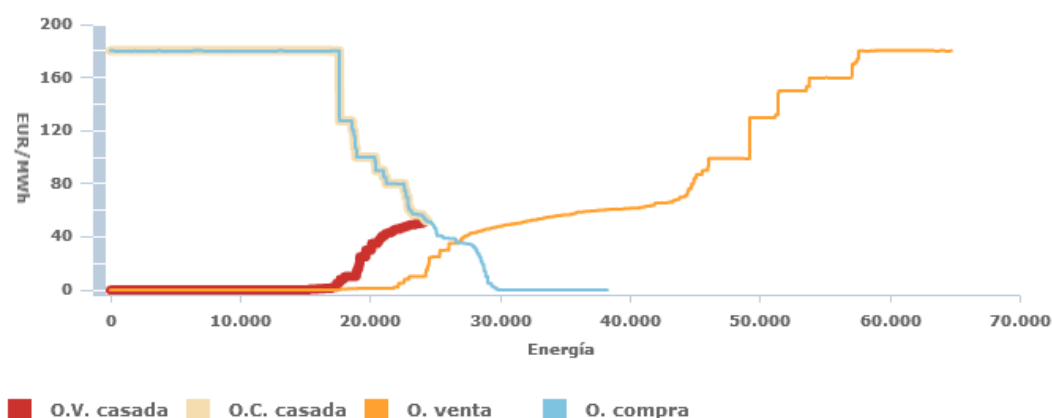


Figura 2.3. Corba agregada d'oferta i demanda.

Per una banda, els productors d'energia estan obligats a presentar, davant l'Operador de Mercat, ofertes econòmiques de venda d'energia elèctrica per cadascuna de les seves unitats de producció i cada període de programació. Les ofertes de producció s'ordenen segons el preu de l'oferta. L'ordre

d'entrada en funcionament de les unitats de producció parteix de la que ha presentat un preu més baix, fins a igualar la demanda d'energia per al mateix període de programació.

Per altra banda, els agents comercialitzadors han de realitzar ofertes econòmiques d'adquisició d'energia elèctrica a l'Operador del Mercat per a cada període de programació per tal de cobrir la demanda de subministrament dels seus clients.

L'Operador del Mercat s'encarrega de rebre les ofertes de venda i adquisició de l'energia dels diferents participants en el mercat diari de l'energia elèctrica, i del procés de cassació de les ofertes fins a igualar la demanda i la producció en cada període de programació.

Un cop finalitzada la cassació, l'Operador de Mercat té l'obligació de comunicar, a tots els subjectes participants, els resultats de la cassació de les ofertes i els preus de l'energia resultants.

Finalment, s'encarrega de liquidar i comunicar els pagaments i cobraments resultants de la cassació, així com de comunicar a l'Operador del Sistema els resultats de la cassació per a tots els períodes de programació.

3. Transició energètica

“El sistema energètic ha iniciat un procés de transició cap a un nou paradigma caracteritzat per la descarbonització, la descentralització de la generació, l’electrificació de l’economia, la participació més activa dels consumidors i un ús més sostenible dels recursos.” [10]

El passat 5 d’octubre de 2018, el govern espanyol va publicar un Real Decret amb mesures urgents per a la transició energètica i la protecció dels consumidors. Tal com s’evidencia en el text, el sistema elèctric tradicional s’enfronta en l’actualitat a molts reptes que desemboquen inevitablement cap a un procés de renovació i transició del sistema elèctric del país.

La publicació d’aquest Real Decret s’ha vist influenciada en gran mesura per les directives europees sorgides durant els darrers mesos a favor de la lluita contra el canvi climàtic, i en un context global de foment de la transició energètica amb l’Acord de París.

Alguns dels principals reptes a què s’enfronta el sistema són:

- Increment en el preu final de l’energia per l’augment del preu dels combustibles fòssils en els mercats internacionals i l’increment en la cotització pels drets d’emissió de CO₂. A tall d’exemple, el preu mitjà de l’electricitat el setembre de 2018 va ser de 71,35 €/MWh, un valor molt proper al màxim històric mensual de 73,14 €/MWh registrat el gener de 2006.
- Descarbonització de l’economia mitjançant una major aportació d’energies renovables, una mobilitat més sostenible i més eficiència energètica.
- Creació de mesures de protecció dels consumidors i en contra de la pobresa energètica.
- Integració en el sistema de l’autoconsum elèctric renovable com a element imprescindible en la transició energètica. Referent a aquest punt, l’Abril de 2019 es va publicar el Real Decret 244/2019 pel que es regulen les condicions administratives, tècniques i econòmiques de l’autoconsum d’energia elèctrica [11].
- Equilibri constant entre la producció i consum d’energia dins el sistema.

La necessitat d’una transició energètica, cap a un sistema socialment, econòmicament i mediambientalment més sostenible, és una realitat.

Vinculats a la transició energètica sorgeixen els conceptes de microxarxa, vehicle elèctric, emmagatzematge energètic, transport d’energia elèctrica en corrent continu, comptadors i xarxes intel·ligents, gestió activa de la demanda, generació distribuïda i autoconsum, entre d’altres.

Concretament, dins l'abast del projecte es considera la integració de la generació distribuïda, amb instal·lació de sistemes fotovoltaics i emmagatzematge d'energia, la gestió intel·ligent de la demanda i l'aportació dels Agregadors com un agent nou dins el mercat de l'electricitat.

3.1. Generació Distribuïda i Gestió de la Demanda

Tradicionalment, el concepte de producció d'energia s'ha relacionat amb grans centres de generació destinats a abastir, a grans capacitats i distàncies, als consumidors a través d'àmplies xarxes de transport i distribució d'energia elèctrica. Aquest concepte està evolucionant en l'actualitat cap al que es denomina Generació Distribuïda d'energia elèctrica.

La Generació Distribuïda consisteix en un augment de la proximitat entre els punts de generació i consum d'energia, reduint significativament les pèrdues per transport i distribució. Les instal·lacions considerades com a fonts d'energia distribuïda consisteixen en plantes de generació d'energia a petita escala, on cobren especial importància la integració de les fonts d'energia renovable [12].

En resum, els principals avantatges de la Generació Distribuïda són:

- Integració de les fonts d'energia renovables.
- Descongestió de les xarxes de transport d'energia.
- Suport en el balanç energètic en períodes de gran demanda.
- Reducció en els costos de manteniment i inversió dels sistemes de transport i distribució.

Per contra, la Generació Distribuïda també té desavantatges com:

- Injecció de possibles fluctuacions que afectin la qualitat de subministrament de l'electricitat.
- Major complexitat dels sistemes d'adquisició i gestió de dades.
- Cost d'inversió inicial elevat.

Conjuntament amb el concepte de Generació Distribuïda sorgeix un nou sistema, conegut com a Gestió de la Demanda o *Demand Response* [13], que considera el control horari de les corbes de demanda d'energia elèctrica.

La Gestió de la Demanda permet adequar el balanç d'energia elèctrica entre la capacitat de producció del sistema i el consum mitjançant canvis en la demanda, i no en la producció, tal com s'ha fet fins al moment. Els mecanismes de gestió de la demanda permeten reduir els pics de consum en cas que el sistema ho requereixi i són complementaris als sistemes de generació distribuïda, ja que aquests se solen caracteritzar per ser tecnologies renovables que no garanteixen una regularitat en la seva generació.

3.2. Agregador de Demanda

La majoria de sistemes de Generació Distribuïda no tenen la potència necessària per participar directament en el Mercat. Conseqüentment, per treure partit dels beneficis de participació en el Mercat necessiten integrar-se dins d'un nou agent responsable de la gestió conjunta de diversos recursos energètics.

Un Agregador és una agrupació d'un cert nombre de consumidors, que compten amb sistemes de generació, emmagatzematge o gestió de la demanda, i que es presenta davant el Mercat com una potència comuna. Algunes formes típiques d'agregador són:

- Plantes de Generació "Virtual", o *Virtual Power Plans* (VPP): Sistemes formats per conjunts de petits generadors, consumidors i sistemes flexibles d'emmagatzematge.
- Microxarxes: Sistemes, geogràficament propers, formats per conjunts de petits generadors, consumidors i sistemes flexibles d'emmagatzematge.
- Flotes de vehicles elèctrics.

Els Agregadors són agents capaços de gestionar un ventall de recursos energètics, per tal d'obtenir el màxim benefici de la xarxa.

La modulació del consum que ofereix l'agregació de consumidors amb gestió de la demanda, permet a l'Agregador presentar-se als mercats secundaris del sistema elèctric com un mecanisme d'ajust d'últim moment per cassar la producció i la demanda real del sistema. Actualment, només participen en els mercats d'ajustos alguns generadors, que ofereixen més producció d'energia a un elevat preu i sovint a costa del consum de combustibles fòssils. Per contra, l'Agregador participaria en aquests mercats oferint una reducció de la demanda a canvi d'una retribució.

La relació dels Agregadors amb els Operadors i la resta d'agents del sistema elèctric està pendent de regulació a l'estat espanyol [14].

4. Modelització d'un Agregador de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el mercat elèctric

En el marc de la transició energètica, contextualitzada en el capítol 3, sorgeix l'objecte d'estudi d'aquest Treball de Final de Grau.

Prenent com a referència principal l'article [3], *Optimal Planning and operation of aggregated distributed energy resources with market participation*, es proposa l'optimització d'un model de programació lineal que busqui minimitzar els costos associats a la planificació i operació d'un sistema de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el Mercat Elèctric, gestionat de forma conjunta per un Agregador de Demanda.

Els sistemes de Recursos Energètics Distribuïts inclouen sistemes de generació amb fonts renovables, emmagatzematge d'energia i gestió de la demanda.

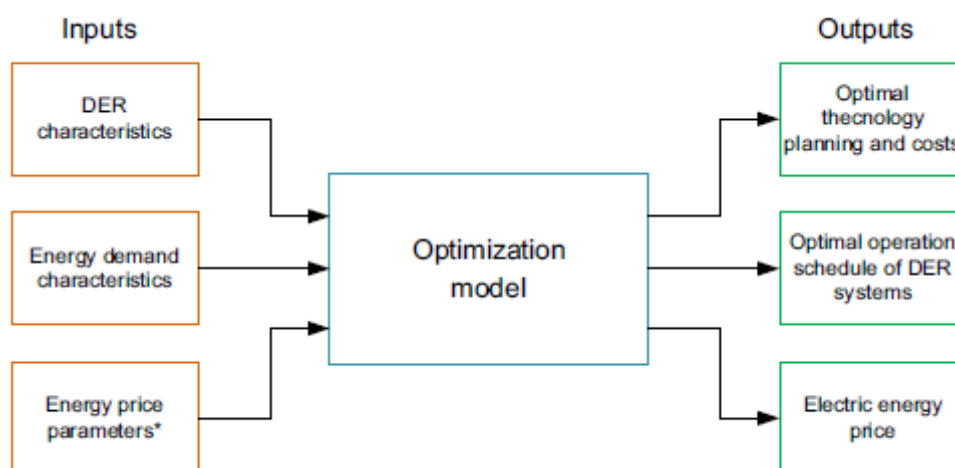


Figura 4.1. Diagrama de blocs del model d'optimització proposat [3]

Per una banda, les principals dades d'entrada del model d'optimització són les característiques específiques del sistema de Recursos Energètics Distribuïts proposat, així com les corbes de demanda energètica i els paràmetres relacionats amb el preu de l'energia elèctrica.

Per altra banda, gràcies a l'execució del model, s'obté un resultat de costos associats al model i una planificació òptima d'instal·lació de les tecnologies proposades. També s'obté l'esquema d'operació del sistema per a cada període de programació i una visió general de l'impacte que poden arribar a tindre les agregacions de consumidors dins el Sistema Elèctric.

4.1. Metodologia: AIMMS

El mètode d'estudi emprat consisteix en una investigació de tipus inductiu, quantitatiu i experimental, mitjançant la qual s'analitzen numèricament casos particulars per tal d'extreure conclusions de caràcter general. És a dir, a partir de l'observació sistemàtica de la realitat i l'experimentació es planteja la generalització d'una teoria.

Per a la definició i optimització del model s'ha utilitzat el programari AIMMS [15].

AIMMS és una plataforma que permet la configuració d'aplicacions de suport en la presa de decisions de sistemes tecnològics. El programa compta amb diferents línies de treball: *AIMMS Developer*, *AIMMS PRO* i *AIMMS WebUI*. En aquest cas, s'utilitza l'entorn de l'*AIMMS Developer*.



Figura 4.2. Logotip de la companyia desenvolupadora AIMMS. [16]

La programació dins d'*AIMMS Developer* ofereix un entorn de desenvolupament integral per a la creació d'eines de suport en la presa de decisions i aplicacions avançades de planificació per a l'optimització d'operacions i recursos.

Els components clau del programari són:

- Llenguatge de modelització matemàtica.
- Interfície d'usuari.
- Eines de productivitat i diagnòstic.
- Manipulació de dades.
- Desplegament de models.
- Eines de resolució o *solvers*.

El sistema de modelització d'AIMMS ofereix una notació amb índexs, que ajuda a captar la complexitat dels problemes tal com apareixen en situacions de la vida real. A més, el llenguatge utilitzat permet expressar càlculs complexos de manera compacta, tot proporcionant una combinació potent de definicions multidimensionals i procediments que s'actualitzen automàticament. Les definicions dins el programa permeten crear relacions úniques entre les diferents entitats del model, sense preocupar-se per l'ordre d'execució d'aquest.

Una de les principals característiques de l'AIMMS és la seva capacitat d'especificar i resoldre models de programació matemàtica (linears, no linears, mixtos, etc.) utilitzant la mateixa notació. O sigui, amb una sola definició, un model d'optimització pot ser transferit i resolt per diferents eines de resolució pioneres a escala mundial. Aquest fet permet la formulació d'un gran nombre de models matemàtics, com són la programació lineal, la programació lineal entera mixta, la programació no lineal, etc.

Així, per a traslladar un problema de la vida real a un model d'optimització en AIMMS [17], cal considerar els següents passos:

- Descripció de les dades d'entrada i sortida, utilitzant *sets* i índexs (*indexed identifiers*).
- Definició del programa matemàtic.
- Especificació de procediments de processament de les dades.
- Inicialització de les dades d'entrada a partir de fitxers i bases de dades.
- Resolució del programa matemàtic.
- Mostra de resultats.

4.1.1. Definició de sets i paràmetres generals

El model sota estudi consisteix en l'optimització en la gestió per part d'un Agregador de Demanda que gestiona un gran nombre de clients, els quals compten amb diferents configuracions de sistemes de Recursos Energètics Distribuïts.

En primer lloc, el model es basa en sets temporals, a partir dels quals es defineixen el conjunt de variables i restriccions que el defineixen. Per intentar simplificar-ho, s'ha definit el conjunt d'un any a partir d'un dia representatiu de cada mes.

En segon lloc, es planteja el model com un conjunt equilibrat de quatre tipus diferents de clients, caracteritzats segons el tipus d'unitat familiar corresponent:

- **Tipus 1:** El cap de família té menys de 35 anys.
- **Tipus 2:** El cap de família té una edat compresa entre els 35 i els 65 anys.
- **Tipus 3:** El cap de família té més de 65 anys.
- **Tipus 4:** Famílies amb nens per sota de 14 anys.

Taula 4.1. Definició dels sets principals del model.

SET	DEFINICIÓ	ÍNDEX	VALOR
Hora	Conjunt d'hores d'un dia tipus.	h	{1, ..24}
Mes	Conjunt de mesos d'un any tipus.	m	{gen, feb, ...}
Hores Vespre	Subset del set d'hores, corresponent a unes hores determinades.	hv	{13, ..20}
Clients	Conjunt de clients integrants de l'Agregador.	c	{1, ..4}

Més enllà de la definició dels sets i els índexs que serviran de referència per a la definició del conjunt del model d'optimització, també és necessari definir alguns paràmetres generals del model que afecten el seu conjunt.

Taula 4.2. Definició dels paràmetres generals del model.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Vida Útil	Anys de vida útil aproximats de les instal·lacions del sistema. S'utilitza com a horitzó temporal del model.	20	anys
Increment Temps	Paràmetre auxiliar per a la definició de restriccions i variables energètiques dins el model.	1	hora
Dies	Nombre total de dies considerats per mes. S'usa per a extrapolar mensualment les dades obtingudes per a cada dia tipus. {31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31}	m	dies
Núm. Habitatges	Nombre total de clients considerats dins l'Agregador.	c	clients
Clients Equivalent	Nombre de clients equivalents per cada tipus d'habitatge. {1, 2, 2 i 4}	c	clients

El nombre d'habitatges per cada tipus de client és el paràmetre clau que permet la posterior formulació de diferents casos, segons la mida de l'Agregador.

Es considera la modelització de vuit casos diferents d'Agregador, de 40.000, 100.000, 200.000, 400.000, 1.000.000, 2.000.000, 4.000.000 i 8.000.000 d'habitatges. El nombre total d'habitatges es distribueix de manera equitativa entre els quatre tipus de clients definits anteriorment. Per exemple, per al cas de l'Agregador de 40.000 habitatges se'n consideren 10.000 per a cada tipus.

Per acabar, un altre dels aspectes claus dins la definició general del model és la parametrització de les corbes de demanda energètica, tant tèrmiques com elèctriques. Cal no oblidar que en essència el model estudiat no deixar de ser un model energètic, objectiu general dels quals es basa en la garantia de subministrament d'energia al consumidor final.

Taula 4.3. Definició dels paràmetres de demanda energètica del model.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Demanda Tèrmica	Corbes de demanda d'energia tèrmica agregada per cada mes i tipus de client.	c, m	MWh
Demanda Elèctrica	Corbes horàries de demanda d'energia elèctrica per cada tipus de client i 12 dies tipus representatius de cada mes.	c, m, h	MWh

Pel que fa a la demanda elèctrica, es proposen dues corbes horàries de consum característic per a cada tipus de client, una per als mesos d'hivern i una altra per als mesos d'estiu.

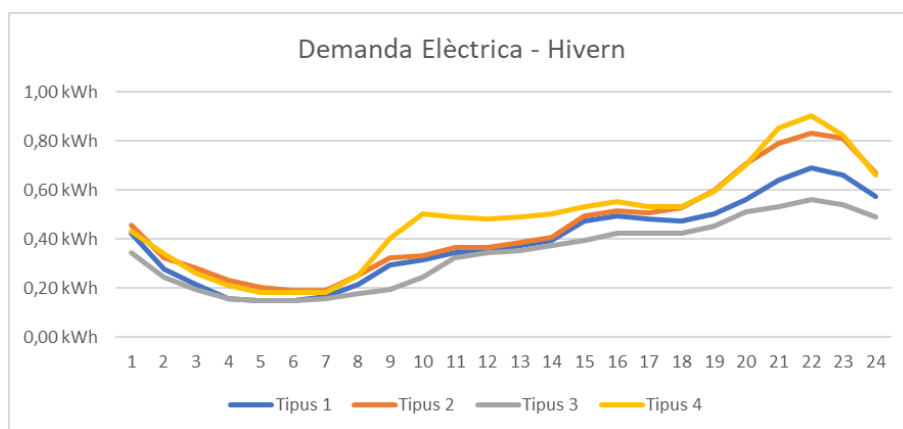


Figura 4.3. Corbes característiques demanda elèctrica – Hivern

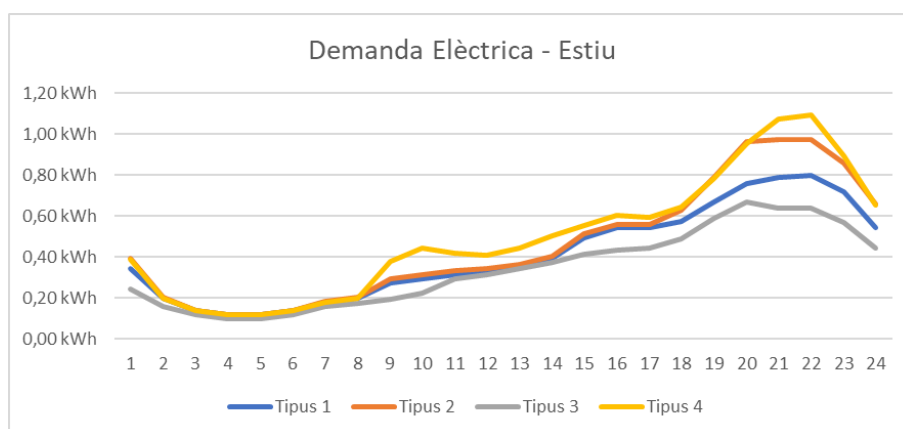


Figura 4.4. Corbes característiques demanda elèctrica – Estiu

La demanda tèrmica s'imputa dins el model en forma de consums agregats mensuals en funció del tipus de client.

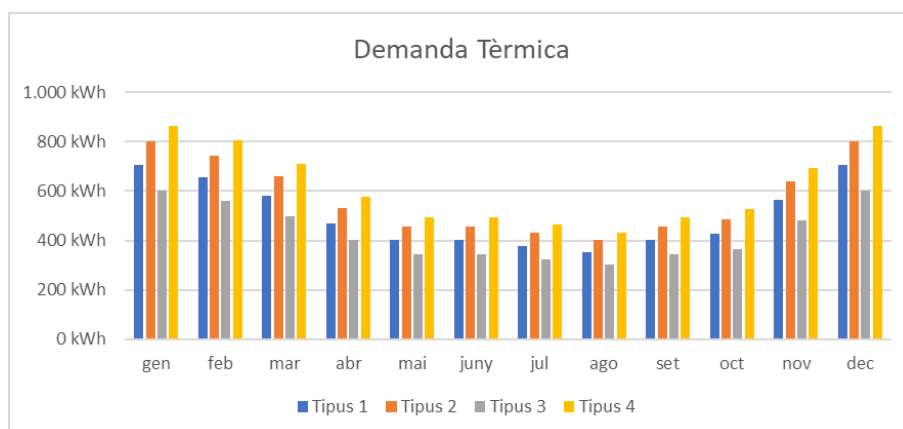


Figura 4.5. Demanda tèrmica mensual.

4.2. Formulació de l'objectiu

L'objectiu principal de la modelització d'un Agregador de Recursos Energètics Distribuïts rau en l'obtenció d'un model de planificació òptima, tant en la inversió com en l'operació, per a aquests sistemes energètics integrats.

Un agregador de demanda s'encarrega de la gestió d'un conjunt de recursos energètics distribuïts, tot buscant maximitzar els beneficis econòmics resultants de la seva operació. En aquest cas, es considera l'Agregador com un agent més dins el mercat elèctric de l'energia i s'estudia l'efecte del seu impacte sobre el preu de mercat.

La funció objectiu del model consisteix a minimitzar el Cost Total de l'Agregador, considerant tot un conjunt de paràmetres, variables i restriccions.

$$\text{Funció Objectiu} = \min(\text{Cost Total}) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

El Cost Total, directament relacionat amb el model d'operació del sistema, es veu afectat per cadascun dels costos associats als diferents recursos energètics distribuïts que conformen l'Agregador:

- **Cost Xarxa Elèctrica:** Cost total de l'Agregador pel consum d'energia elèctrica, considerant el preu de cost de l'energia, vinculat a la xarxa de transport i distribució, i el total d'energia que s'adquireix de la xarxa al llarg dels anys útils de la instal·lació.

$$\text{Cost}_{\text{Xarxa}} = \text{VidaÚtil} * \text{PreuXarxa} * \sum_{m=1}^{m=12} \left(\text{Dies}_m * \left(\sum_{h=1}^{h=24} \text{TransaccióE}_{\text{compra}_{m,h}} \right) \right) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

- **Cost Transacció Elèctrica:** Cost o benefici total de l'Agregador per la transacció d'energia amb la xarxa elèctrica.

$$\text{Cost}_{\text{Elèctric}} = \text{VidaÚtil} * \sum_{m=1}^{m=12} \left(\text{Dies}_m * \left(\sum_{h=1}^{h=24} \text{ElèctricCost}_{m,h} \right) \right) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

- **Cost Potència Elèctrica:** Cost total de l'Agregador per accés a la potència elèctrica.

$$\text{Cost}_{\text{PotènciaE}} = \text{VidaÚtil} * \text{TarifaPotènciaE} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{NumClients}_c * \text{PotènciaContractada}_c) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

- **Cost Fotovoltaica:** Cost total d'inversió en les instal·lacions fotovoltaïques, considerant un preu d'inversió determinat i la potència total instal·lada per l'Agregador.

$$\text{CostInv}_{FV} = \text{PreuInv}_{FV} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{PotènciaFV}_c * \text{NumClients}_c) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

- **Cost O&M Fotovoltaica:** Cost total d'operació i manteniment de les instal·lacions fotovoltaïques al llarg de la vida útil de la instal·lació, considerant un preu fix anual i la potència fotovoltaica instal·lada.

$$\text{CostO\&M}_{FV} = \text{PreuO\&M}_{FV} * \text{VidaÚtil} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{PotènciaPV}_c * \text{NumClients}_c) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

- **Cost Bateria:** Cost total d'inversió en bateries com a sistema d'emmagatzematge d'energia elèctrica, considerant en el preu d'inversió inicial la substitució dels equips cada 8 anys i la capacitat total instal·lada.

$$\text{CostInv}_{Bat} = \text{PreuInv}_{Bat} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{CapacitatBat}_c * \text{NumClients}_c) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

- **Cost Energia Tèrmica:** Cost total de l'Agregador pel consum d'energia tèrmica, en forma de Gas Natural, en funció d'un preu fix de compra del gas.

$$\text{Cost}_{\text{EnergiaT}} = \text{VidaÚtil} * \text{PreuEnergiaT} * \sum_{m=1}^{m=12} \left(\sum_{c=1}^{c=4} (\text{NumClients}_c * \text{ConsumGN}_{c,m}) \right) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

- **Cost Potència Tèrmica:** Cost total de l'Agregador per accés a la potència tèrmica.

$$\text{Cost}_{\text{PotènciaT}} = \text{VidaÚtil} * \text{TarifaPotènciaT} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{NumClients}_c * \text{ClientsEq}_c) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

- **Cost HP:** Cost total d'inversió en les bombes de calor, considerant un preu d'inversió determinat i la potència elèctrica nominal de les bombes instal·lades.

$$\text{CostInv}_{HP} = \text{PreuInv}_{HP} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{PotènciaHP}_c * \text{NumClients}_c) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

- **Cost O&M HP:** Cost d'operació i manteniment de les bombes de calor, considerant un preu fix anual en funció de la potència instal·lada.

$$\text{CostO\&M}_{\text{HP}} = \text{PreuO\&M}_{\text{HP}} * \text{VidaÚtil} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{PotènciaHP}_c * \text{NumClients}_c) \quad (\text{Eq. 4.11})$$

- **Cost DR:** Cost total d'inversió en els equips necessaris per a efectuar la "Resposta de Demanda" o *Demand Response* per part dels clients de l'Agregador.

$$\text{Cost}_{\text{DR}} = \text{PreuInv}_{\text{DR}} * \sum_{c=1}^{c=4} (\text{NumClients}_c * \text{ClientsEq}_c) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

4.3. Recursos Energètics Distribuïts

El Sistema de Recursos Energètics Distribuïts considerat està format per un conjunt d'eines i instal·lacions que faciliten la integració de les energies renovables i la flexibilitat de l'Agregador de demanda. El sistema inclou la generació d'energia a partir de fonts renovables, l'emmagatzematge d'energia i el sistema de *Demand Response* o Resposta a la Demanda. Tanmateix, també es considera la connexió dels membres de l'Agregador al mercat elèctric convencional i la gestió de la seva demanda tèrmica.

Cadascuna de les eines i instal·lacions mencionades es caracteritzen a partir d'uns paràmetres propis i de la definició de variables i restriccions específiques.

4.3.1. Emmagatzematge elèctric

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia són un dels elements que poden conformar el sistema de Recursos Energètics Distribuïts. En aquest cas, es considera la instal·lació de bateries d'emmagatzematge elèctric.

A continuació, a la Taula 4.4, es defineixen els seus paràmetres específics. Per altra banda, a la Taula 4.5, es troben les variables de decisió dins del model d'optimització referents al sistema d'emmagatzematge amb bateries.

Taula 4.4. Definició dels paràmetres específics del sistema de bateries.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	VALOR	UNITATS
Rendiment	Rendiment associat als processos de càrrega i descàrrega de les bateries d'emmagatzematge elèctric.	0,95	%
SOC Inicial	Estat de càrrega inicial de la bateria.	0,5	%
Màxim instal·lació	Capacitat màxima d'instal·lació de bateries per client.	1	MWh

Taula 4.5. Definició de les variables de decisió específiques dels sistemes de bateries.

VARIABLES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Capacitat	Capacitat nominal dels sistemes de bateries instal·lats.	c	MWh
SOC	Nivell de càrrega energètica de les bateries.	c, m, h	MWh
Càrrega	Augment del nivell de càrrega energètica de les bateries.	c, m, h	MWh
Descàrrega	Disminució del nivell de càrrega energètica de les bateries.	c, m, h	MWh

Adicionalment, es defineixen un conjunt de restriccions que regulen l'operació dels sistemes de bateries dins el model plantejat.

- I. **Balanç energètic del SOC:** L'equació general considera el SOC de la bateria igual al SOC de la bateria a l'hora anterior, més la càrrega i menys la descàrrega d'aquesta corresponents a aquella hora. Com a excepcions, es defineix quina ha de ser l'expressió a seguir en l'hora 1 de tots els mesos.

```

if (ord(m)=1 and ord(h)=1)
    then SOC_Bat(c,m,h) = SOCInicial_Bat * Capacitat_Bat(c) + Carrega_Bat(c,m,h) - Descarrega_Bat(c,m,h)
elseif (ord(m)>1 and ord(h)=1)
    then SOC_Bat(c,m,h) = SOC_Bat(c,m-1, '24') + Carrega_Bat(c,m,h) - Descarrega_Bat(c,m,h)
else
    SOC_Bat(c,m,h) = SOC_Bat(c,m,h-1) + Carrega_Bat(c,m,h) - Descarrega_Bat(c,m,h)
endif;

```

Figura 4.6. Codi restricció I dels sistemes de bateries.

- II. **Nivell de càrrega màxim:** El nivell de càrrega de la bateria no pot ser mai superior a la capacitat nominal d'aquesta.

$$\text{SOC_Bat}(c,m,h) \leq \text{Capacitat_Bat}(c)$$

Figura 4.7. Codi restricció II dels sistemes de bateries.

- III. **Restriccions de descàrrega:** La descàrrega energètica de les bateries es veu limitada pel nivell de càrrega anterior, és a dir, pel SOC de la bateria. Excepcionalment, cal definir les expressions a seguir en l'hora 1 de tots els mesos.

```

if ord(m)=1 and ord(h)=1
    then Descarrega_Bat(c,m,h) <= SOCInicial_Bat * Capacitat_Bat(c)
elseif ord(m)>1 and ord(h)=1
    then Descarrega_Bat(c,m,h) <= SOC_Bat(c,m-1, '24')
else
    Descarrega_Bat(c,m,h) <= SOC_Bat(c,m,h-1)
endif;

```

Figura 4.8. Codi restricció III dels sistemes de bateries.

- IV. **Restriccions de càrrega:** La càrrega energètica de les bateries es veu limitada pel nivell de càrrega anterior de la bateria i per la seva capacitat nominal. Com a excepció, es requereix definir les expressions a seguir en l'hora 1 de tots els mesos.

```

if ord(m)=1 and ord(h)=1
    then Carrega_Bat(c,m,h) <= (1-SOCInicial_Bat) * Capacitat_Bat(c)
elseif ord(m)>1 and ord(h)=1
    then Carrega_Bat(c,m,h) <= Capacitat_Bat(c) - SOC_Bat(c,m-1,h+23)
else
    Carrega_Bat(c,m,h) <= Capacitat_Bat(c) - SOC_Bat(c,m,h-1)
endif;

```

Figura 4.9. Codi restricció IV dels sistemes de bateries.

- V. **Nivell de càrrega mínim:** Segons aquesta restricció, l'estat de càrrega de les bateries no pot ser mai inferior a un 20% de la capacitat nominal de les mateixes i ha d'acabar cada dia amb un nivell de càrrega igual o superior a l'inicial.

```

if ord(h)=24
    then SOC_Bat(c,m,h) >= SOCInicial_Bat*Capacitat_Bat(c)
else
    SOC_Bat(c,m,h) >= 0.2*Capacitat_Bat(c)
endif;

```

Figura 4.10. Codi restricció V dels sistemes de bateries.

- VI. **Límit capacitat d'instal·lació:** Per tal d'assegurar la viabilitat tècnica del sistema d'emmagatzematge, es limita la capacitat de bateries instal·lada per cada client.

$$\text{Capacitat_Bat}(c) \leq \text{ValorMAX_PV_Bat}$$

Figura 4.11. Codi restricció VI dels sistemes de bateries.

4.3.2. Demand Response

L'anomenada *Demand Response*, o Resposta a la Demanda, consisteix a efectuar un canvi en la corba de consum original d'un consumidor determinat per tal d'optimitzar el balanç energètic en funció de, per exemple, la capacitat de generació fotovoltaica del mateix sistema.

Segons l'article de referència [3], les càrregues més susceptibles al seu desplaçament dins la corba de consum són els electrodomèstics, com la rentadora, el rentaplats i l'assecadora, que representen aproximadament un 13,3% del consum elèctric diari d'un consumidor típic a Espanya.

Els paràmetres i les variables de decisió específiques del sistema de Resposta a la Demanda, dins el model generat, es resumeixen en la Taula 4.6 i la Taula 4.7, respectivament.

Taula 4.6. Definició dels paràmetres específics dels sistemes de resposta a la demanda.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Demanda original	Corbes de demanda elèctrica original.	c, m, h	MWh
Coefficient màxim DR	Part proporcional màxima de la demanda elèctrica que es permet traslladar per <i>Demand Response</i> .	0,133	%

Taula 4.7. Definició de les variables de decisió específiques dels sistemes de resposta a la demanda.

VARIABLES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Demanda nova	Corbes de demanda elèctrica resultants de l'optimització de la demanda amb el DR.	c, m, h	MWh
Increment de demanda	Increment horari de la demanda elèctrica respecte de les corbes de demanda originals.	c, m, h	MWh
Decrement de demanda	Decrement horari de la demanda elèctrica respecte de les corbes de demanda originals.	c, m, h	MWh

Adicionalment, es defineixen un conjunt de restriccions que regulen l'operació dels sistemes de resposta a la demanda:

- I. **Demanda diària constant:** La demanda diària acumulada amb les noves corbes de demanda elèctrica ha de ser necessàriament igual a la demanda acumulada original.

$$\text{sum}(h, \text{DemandaElectrica_new}(c, m, h)) = \text{sum}(h, \text{DemandaElectrica}(c, m, h))$$

Figura 4.12. Codi restricció I del sistema de Demand Response.

- II. **Límit màxim de desplaçament de càrrega:** Mitjançant aquesta restricció es limita el total de demanda elèctrica diària que cada consumidor pot desplaçar.

$$\text{sum}(h, \text{DemandaElectrica_Increment}(c, m, h)) \leq \text{DemandaElectrica_maxDR} * \text{sum}(h, \text{DemandaElectrica}(c, m, h))$$

Figura 4.13. Codi restricció II del sistema de Demand Response.

4.3.3. Producció elèctrica instal·lació Fotovoltaica

Un dels sistemes més rellevants dins els Recursos Energètics Distribuïts són les instal·lacions fotovoltaïques de generació d'energia elèctrica. La producció fotovoltaica és la principal font d'energia elèctrica, juntament amb l'energia procedent de la xarxa, i és el sistema que permet, en cas que

existeixi un excedent, la venda d'energia a la xarxa. Com es pot veure, és un sistema clau dins el concepte de generació distribuïda i d'agregador de demanda.

Tal com s'ha fet per la resta d'instal·lacions, s'especifiquen els paràmetres de configuració del sistema fotovoltaic (Taula 4.8) i les variables de decisió per aspectes fotovoltaics dins el model (Taula 4.9).

Taula 4.8. Definició dels paràmetres específics dels sistemes de producció fotovoltaica.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
DNI [18]	Irradiància Directa Normal (<i>Direct Normal Irradiance</i>). Quantitat de radiació solar registrada en un punt geogràfic concret.	m, h	W/m ²
G	Irradiància normalitzada a partir de la qual s'ofereixen les característiques tècniques dels panells solars fotovoltaics.	1.000	W/m ²
Pèrdues	Pèrdues elèctriques de la instal·lació fotovoltaica.	0,24	%
Màxim instal·lació	Capacitat màxima d'instal·lació de panells fotovoltaics per client.	1	MWh

Taula 4.9. Definició de les variables de decisió específiques dels sistemes de producció fotovoltaica.

VARIABLES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Potència	Potència nominal fotovoltaica instal·lada.	c	MW
Producció	Generació d'energia elèctrica a partir de la potència fotovoltaica instal·lada al sistema.	c, m, h	MWh

A continuació, s'especifiquen les equacions i restriccions que regulen el sistema fotovoltaic dins el model de l'Agregador.

- I. **Producció d'energia elèctrica:** L'energia generada per la instal·lació depèn tant de la potència nominal instal·lada com del rendiment del sistema i les condicions meteorològiques.

$$(Irradiancia(m,h) * Potencia_FV(c) * (1 - Perdues_FV) * Increment_temps) / G$$

Figura 4.14. Codi restricció I del sistema de producció fotovoltaica.

- II. **Límit capacitat d'instal·lació:** Per tal d'assegurar la viabilitat tècnica del sistema de producció fotovoltaica, es limita la potència nominal instal·lada per cada client.

$$Potencia_FV(c) \leq ValorMAX_PV_Bat$$

Figura 4.15. Codi restricció II del sistema de producció fotovoltaica.

4.3.4. Producció tèrmica instal·lació Bomba de Calor

Un dels sistemes proposats dins el model, per tal de cobrir la demanda tèrmica del sistema, és la instal·lació de bombes de calor alimentades amb energia elèctrica. Aquest tipus d'instal·lació permeten la gestió conjunta de diferents formes d'energia, com són l'elèctrica i la tèrmica, i introdueixen més variables de decisió dins el model a optimitzar.

Els paràmetres característics de les instal·lacions de bombes de calor, així com les variables de decisió, queden definits respectivament a la Taula 4.10 i la Taula 4.11.

Taula 4.10. Definició dels paràmetres específics de les instal·lacions de bombes de calor.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
COP	Coefficient de rendiment que relaciona la sortida de calor del condensador de la bomba amb la potència elèctrica subministrada al compressor (<i>Coefficient Of Performance</i>).	2,50	-
Pèrdues	Pèrdues tèrmiques associades al conjunt del sistema tèrmic de la instal·lació de les bombes de calor.	0,15	%

Taula 4.11. Definició de les variables de decisió específiques de les instal·lacions de bombes de calor.

VARIABLES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Potència	Potència nominal de les instal·lacions de bombes de calor.	c	MW
Consum elèctric	Consum elèctric associat a la generació de calor a partir de les bombes de calor.	c, m, h	MWh

Finalment, es defineixen les restriccions que regulen l'operació de les instal·lacions de generació tèrmica a partir de les bombes de calor.

- I. **Límit màxim de funcionament:** La potència nominal de la bomba de calor limita el consum elèctric màxim que aquesta és capaç d'usar.

$$\text{ConsumEE_HP}(c, m, h) \leq \text{Potencia_HP}(c)$$

Figura 4.16. Codi restricció I del sistema de bombes de calor.

- II. **Restricció horària de funcionament:** La bomba de calor està obligada a cobrir com a mínim el 30% de la demanda tèrmica total durant unes hores determinades de la tarda (13 - 20 h). D'aquesta manera s'aconsegueix que el model s'ajusti més a la realitat.

$$(0.3 * \text{Demandatermica}(c, m)) \leq (\text{DiesMes}(m) * \sum(h \text{ in Hores_Vespre}, \text{ConsumEE_HP}(c, m, h) * C_O_P * (1 - \text{Perdues_HP})))$$

Figura 4.17. Codi restricció II del sistema de bombes de calor.

4.4. Balanços energètics

Un dels requisits indispensables, dins la gestió i planificació del sistema òptim d'agregador de recursos energètics distribuïts, és cobrir en tot moment la demanda energètica del sistema. Per al cas sota estudi, es considera tant la demanda d'energia tèrmica del sistema, com les corbes de demanda d'energia elèctrica.

4.4.1. Balanç d'energia tèrmica

L'energia tèrmica, dins el model de l'Agregador, s'estudia mensualment degut a les característiques de les dades de demanda tèrmica proporcionades per l'article de referència [3]. És a dir, el model d'optimització proposat ha de cobrir la demanda tèrmica de tots els integrants del sistema.

Per tal de cobrir la demanda tèrmica, es planteja la instal·lació de dues tecnologies diferents:

- **Bombes elèctriques de calor**, introduïdes anteriorment en el capítol 4.3.4.
- **Calderes convencionals**, amb un rendiment aproximat del 80% i alimentades de Gas Natural.

La següent equació (Eq. 4.13) correspon al balanç d'energia tèrmica mensual per cada tipus de client.

$$\text{DemandaTèrmica}_{c,m} = 0,8 \text{ ConsumGN}_{c,m} + \text{Dies}_m \cdot \sum_{h=1}^{h=24} \left(\text{ConsumElecHP}_{c,m,h} \cdot \text{COP} \cdot (1 - \text{Pèrdues}) \right) \quad (\text{Eq. 4.13})$$

4.4.2. Balanç d'energia elèctrica

El balanç elèctric del sistema és més complex que el balanç tèrmic, a causa de l'elevat nombre de tecnologies que hi participen. Aquestes es poden dividir segons si proporcionen electricitat per a cobrir la demanda d'energia elèctrica dels consumidors, o bé si són tecnologies consumidores d'electricitat.

El balanç d'energia elèctrica, a diferència del balanç tèrmic, s'ha de complir de manera horària, per a totes les hores d'operació i per a tots els tipus de client, i s'estableix en l'equació següent.

$$\begin{aligned} \text{TransaccióEE}_{\text{venda}} + \text{DemandaElectrica}_{\text{Nova}} + \frac{\text{CarregaBat}}{\text{RendBat}} + \text{ConsumEE}_{\text{HP}} \\ = \text{ProduccióFV} + (\text{DecàrregaBat} \cdot \text{RendBat}) + \text{TransaccióEE}_{\text{compra}} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Cal destacar que la demanda elèctrica integrada dins el balanç d'energia elèctrica (Eq. 4.14) es correspon amb les noves corbes de demanda obtingudes posteriorment a la planificació amb el sistema de Resposta a la Demanda.

4.5. Participació en el mercat elèctric

Més enllà de la mateixa planificació i operació d'un Agregador de Recursos Energètics Distribuïts, amb el model plantejat es pretén analitzar l'efecte que aquest tipus d'activitats tenen sobre el mercat de l'electricitat a Espanya.

Tot seguit es detalla el mètode utilitzat per estudiar aquest impacte, i obtenir al seu torn, el preu de l'electricitat resultant i el cost elèctric que suposa per a l'Agregador sota estudi.

4.5.1. Corbes de demanda residual

En primer lloc, per tal de modelitzar la participació de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts en el Mercat Elèctric és necessari introduir en el model les corbes de demanda residual.

Les corbes de demanda residual s'obtenen eliminant, de la corba agregada de demanda, la demanda agregada corresponent a determinats competidors. Aquestes corbes estan formades per un seguit de graons, ja que les ofertes que els agents enviant a l'Operador de Mercat es presenten com blocs d'energia amb el seu respectiu preu.

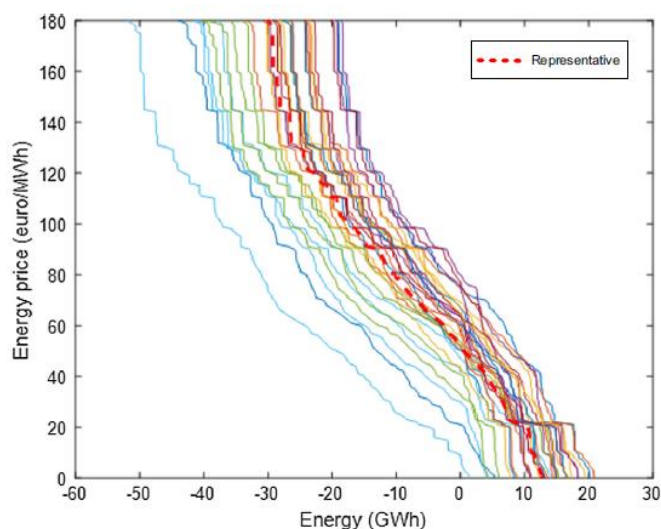


Figura 4.18. Corbes residuals de demanda de Gener a l'hora 10. [3]

Partint de les corbes de demanda representatives, es generen les corbes de cost de l'energia, com a resultat del producte de les diferents quantitats d'energia pel seu preu corresponent.

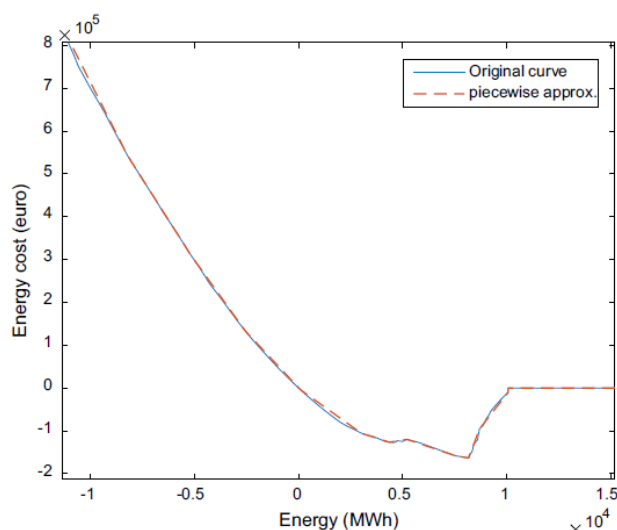


Figura 4.19. Corba de cost de l'energia de Gener a l'hora 8. [3]

En el model d'Agregador plantejat s'introdueixen directament les corbes corresponents al cost de l'energia, ja que l'interval de magnituds proporcionat per la Figura 4.19 és més apropiat a l'ordre de magnituds del sistema.

El mètode seguit per introduir les corbes del cost de l'energia dins el model ha estat la conversió de la corba en una funció lineal definida a trossos, per tal d'evitar la no linealitat del model. Concretament es planteja la modelització de les corbes de cost de l'energia com una funció lineal definida a partir de 23 punts i 22 segments.

Taula 4.12. Definició dels sets auxiliar per a la definició de les corbes de cost de l'energia.

SET	DEFINICIÓ	ÍNDEX	VALOR
Punts	Cada corba de cost de l'energia queda definida segons 23 punts amb coordenades x i y.	p	{1, ..23}
Segments	Subset del set Punts, corresponent als 22 segments recollits entre els 23 punts de cada corba.	seg	{1, ..22}

Un cop definits els sets corresponents (Taula 4.12), s'introdueixen els paràmetres que defineixen cadascuna d'aquestes corbes de cost de l'energia.

Taula 4.13. Definició dels paràmetres específics de les corbes de cost de l'energia.

PARÀMETRES	DEFINICIÓ	DOMINI	UNITATS
Y	Coordenada y dels punts que defineixen les corbes de cost de l'energia.	p, m, h	€
X	Coordenada x dels punts que defineixen les corbes de cost de l'energia.	p, m, h	MWh

És necessari destacar que, a partir de l'extrapolació de la Figura 4.19 i a través d'una aproximació considerant la tendència del mercat elèctric al llarg de l'any, s'han definit els punts, amb les coordenades (x,y), de definició de les corbes representatives per a les 24 hores del dia representatiu de cada mes de l'any.

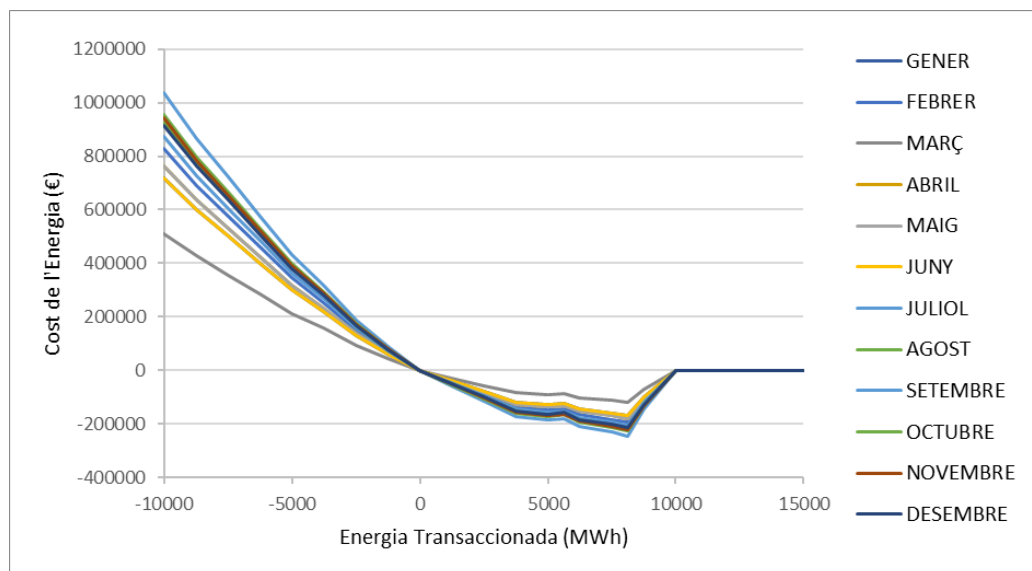


Figura 4.20. Corbes extrapolades de cost de l'energia a l'hora 8.

4.5.2. Mètode de definició del cost elèctric del sistema

En la definició del balanç elèctric (Eq. 4.14) es diferencien dos tipus de transaccions d'energia elèctrica entre el client i la xarxa elèctrica general, la transacció per venda d'energia a la xarxa i la transacció per compra d'energia a la xarxa.

Un cop definides les transaccions d'energia individuals entre cada client i la xarxa general de transport i distribució d'energia, s'introdueixen dues variables que recullen el total d'energia intercanviada entre l'Agregador de Demanda i la xarxa.

A més a més, el mètode de definició del cost elèctric del sistema requereix la creació de les variables auxiliars definides en la Taula 4.14.

Taula 4.14. Definició de les variables auxiliars per a la definició del cost elèctric del sistema.

VARIABLES	DEFINICIÓ	DOMINI
Lambda	Variable auxiliar positiva necessària per a la definició del cost elèctric a partir de les corbes de cost de l'energia.	p, m, h
Binària	Variable auxiliar binària necessària per a la definició del cost elèctric a partir de les corbes de cost de l'energia.	seg, m, h

El mètode de definició del cost elèctric consisteix en primer lloc en el càlcul del resultat del balanç entre l'energia elèctrica comprada i venuda a la xarxa per part de l'Agregador de Demanda. La venda d'energia es considera positiva i la compra negativa dins aquest balanç.

Un cop calculat aquest balanç es relaciona amb la coordenada X corresponent, dins la corba de costos de l'energia, mitjançant l'aplicació de la variable auxiliar Lambda per a cada hora i mes sota estudi.

$$\text{TransaccióEE}_{\text{venda}} - \text{TransaccióEE}_{\text{compra}} = \sum_{p=1}^{p=23} (\text{Lambda}_p \cdot X_p) \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Mitjançant l'equació anterior es troba el punt concret sobre la corba corresponent a la transacció total d'energia, adjudicant a la variable auxiliar Lambda un valor determinat per cadascun dels punts.

Finalment, tal com estableix l'equació següent (Eq. 4.16), es determina el cost elèctric de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts per a cada hora del dia tipus de cada mes.

$$\text{ElèctricCost} = \sum_{p=1}^{p=23} (\text{Lambda}_p \cdot Y_p) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

4.5.3. Restriccions

L'eficàcia del mètode plantejat en el punt anterior ve condicionat per l'aplicació d'unes restriccions amb les quals s'acaba de definir el funcionament matemàtic del mètode dins el model en AIMMS.

- I. **Definició de Lambda:** La suma de valors que pren la variable Lambda per a tots els punts dins el mateix període temporal ha de ser igual a 1.

$$\text{sum}(p, \text{Lambda_Funcio}(p,m,h)) = 1$$

Figura 4.21. Codi restricció I dins la definició del cost elèctric del sistema.

- II. **Definició de la variable Binària:** La coordenada resultant del balanç (Eq. 4.15) tan sols pot correspondre a un dels segments que formen la funció lineal a trossos.

```

if ord(p)=1
    then Lambda_Funcio(p,m,h) <= Binaria_Funcio(p,m,h)
elseif ord(p)=23
    then Lambda_Funcio(p,m,h) <= Binaria_Funcio(p-1,m,h)
else
    Lambda_Funcio(p,m,h) <= Binaria_Funcio(p-1,m,h) + Binaria_Funcio(p,m,h)
endif;
```

Figura 4.22. Codi restricció II dins la definició del cost elèctric del sistema.

- III. **Relació de segments de la funció:** La suma de valors que pren la variable Binària per a tots els segments dins el mateix període temporal ha de ser igual a 1. D'aquesta manera s'aconsegueix que la coordenada escollida només afecti un dels segments de la funció linear a trossos.

```
sum(seg, Binaria_Funcio(seg,m,h)) = 1
```

Figura 4.23. Codi restricció III dins la definició del cost elèctric del sistema.

Adicionalment, apareixen dues restriccions que acoten els valors de la potència contractada per part dels clients de l'Agregador i la venda d'energia a la xarxa.

- I. **Potència contractada:** La potència elèctrica contractada per cada usuari ha de ser igual o major a la potència demandada.

```
PotenciaContractadaEE(c) >= IntercanviEE_positiu(c,m,h)
```

Figura 4.24. Codi restricció I de definició de la potència contractada.

- II. **Límit renovable de venda d'energia a la xarxa:** La venda d'energia a la xarxa ha de ser en tot moment inferior a la producció fotovoltaica i la descàrrega de la bateria d'emmagatzematge d'energia elèctrica.

```
IntercanviEE_negatiu(c,m,h) <= Produccio_FV(c,m,h)*Increment_temps + Descarrega_Bat(c,m,h)*Rend_Bat
```

Figura 4.25. Codi restricció I de definició de la potència contractada.

5. Presentació i anàlisi de resultats

Un cop completament definit el model d'optimització de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts, es procedeix a l'anàlisi dels resultats obtinguts.

En primer lloc, es planteja una anàlisi general de la planificació i operació resultants dels diferents casos del Model, així com un estudi dels costos resultants. En segon lloc, s'analitza la proposta d'optimització del funcionament dels diferents recursos energètics modelitzats.

5.1. Resultats generals de planificació i operació del Model

En la Taula 5.1 i la Figura 5.1 es recull la planificació total d'instal·lació, segons potència o capacitat, de les diferents tecnologies modelitzades en funció de la mida de l'Agregador.

Taula 5.1. Planificació d'instal·lació de recursos segons el nombre de clients de l'Agregador.

Nombre de clients	Quota de mercat [3]	Fotovoltaica	Bateries	Bombes de Calor
0,04 M	0,076%	89 MW	2 MWh	19 MW
0,1 M	0,19%	222 MW	6 MWh	47 MW
0,2 M	0,38%	444 MW	12 MWh	94 MW
0,4 M	0,76%	888 MW	24 MWh	188 MW
1 M	1,9%	2.220 MW	60 MWh	471 MW
2 M	3,8%	4.431 MW	293 MWh	913 MW
4 M	7,6%	11.008 MW	8.831 MWh	1.743 MW
8 M	15,2%	24.124 MW	26.605 MWh	3.485 MW

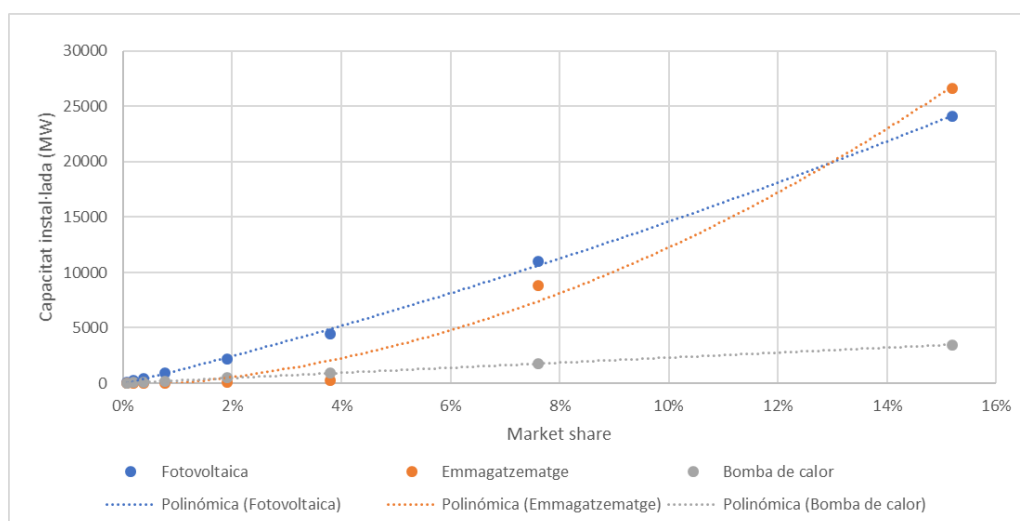


Figura 5.1. Evolució instal·lació de Recursos segons la quota de mercat de l'agregador.

En grans trets, s'observa com la instal·lació de sistemes fotovoltaics i de bombes de calor segueixen un creixement proporcional a la mida de l'Agregador.

La potència fotovoltaica instal·lada per cada client es manté constant, amb un valor mitjà d'instal·lació de 2,2 kW, fins al cas de l'Agregador de 4 milions d'habitatges. Per als dos darrers casos, de 4 i 8 milions d'habitatges, la potència instal·lada augmenta fins a registrar uns valors mitjans de 2,7 i 3,0 kW d'instal·lació de fotovoltaica, respectivament.

En la instal·lació de bombes de calor es dona un fenomen similar que en la fotovoltaica, però amb una tendència contrària al cas anterior. La potència de la bomba instal·lada es manté constant en un valor de 470 W fins a assolir un agregador de 2 milions d'habitatges, on la potència mitjana instal·lada es redueix a 456 W. Per als casos de l'agregador de 4 i 8 milions la potència es redueix fins als 436 W.

Taula 5.2. Planificació d'instal·lació de Bateria segons client i escala de l'Agregador.

	Bateries				
	C1	C2	C3	C4	PROMIG
0,04 M	75,7 Wh	150,1 Wh	-	15,5 Wh	60,3 Wh
0,1 M	75,7 Wh	150,5 Wh	-	15,5 Wh	60,4 Wh
0,2 M	75,7 Wh	150,5 Wh	-	15,5 Wh	60,4 Wh
0,4 M	75,7 Wh	150,5 Wh	-	15,5 Wh	60,4 Wh
1 M	75,7 Wh	150,5 Wh	-	15,5 Wh	60,4 Wh
2 M	195,6 Wh	238,2 Wh	-	152,9 Wh	146,7 Wh
4 M	2.165,5 Wh	2.678,3 Wh	1.451,1 Wh	2.535,6 Wh	2.207,6 Wh
8 M	3.250,8 Wh	3.797,8 Wh	2.579,2 Wh	3.674,8 Wh	3.325,6 Wh

Per contra, l'evolució de la potència instal·lada de sistemes d'emmagatzematge elèctric presenta un creixement gairebé exponencial amb l'augment de la mida de l'Agregador. En la Taula 5.2. **Planificació d'instal·lació de Bateria segons client i escala de l'Agregador**. Taula 5.2, s'observa en detall quina és la planificació en la instal·lació de bateries segons el tipus de client i l'escala de l'Agregador.

Els sistemes d'emmagatzematge proposats per als clients dins dels Agregadors de 2 milions o menys d'habitatges es poden considerar negligibles, ja que són sistemes de menys de 0,2 kWh de capacitat, mentre que la demanda diària d'energia de cada client proposada supera en tots els casos els 10 kWh. Els sistemes d'emmagatzematge proposats per als clients dels Agregadors de 4 i 8 milions s'adeqüen millor a les dimensions dels sistemes de bateries del mercat, tot i ser encara capacitats d'emmagatzematge molt reduïdes en comparació amb la demanda mitjana dels consumidors.

5.1.1. Anàlisis dels costos associats al Model

En la Taula 5.3 i la Figura 5.2 es recull l'evolució del cost total d'operació del sistema Agregador de Recursos Energètics Distribuïts, segons la mida de l'Agregador.

Taula 5.3. Costos totals del sistema segons el nombre de clients de l'Agregador.

Nombre de clients	Quota de mercat [3]	Cost Total	Cost per client
0,04 M	0,076%	794,14 M€	19.853 €
0,1 M	0,19%	1.985,35 M€	19.853 €
0,2 M	0,38%	3.970,69 M€	19.853 €
0,4 M	0,76%	7.941,38 M€	19.853 €
1 M	1,9%	19.853,5 M€	19.853 €
2 M	3,8%	39.892,7 M€	19.946 €
4 M	7,6%	81.077,1 M€	20.269 €
8 M	15,2%	165.893,7 M€	20.737 €

S'observa com el cost total del sistema segueix una tendència pràcticament lineal de costos, que fins i tot es veu augmentada per als casos de l'Agregador de major escala.

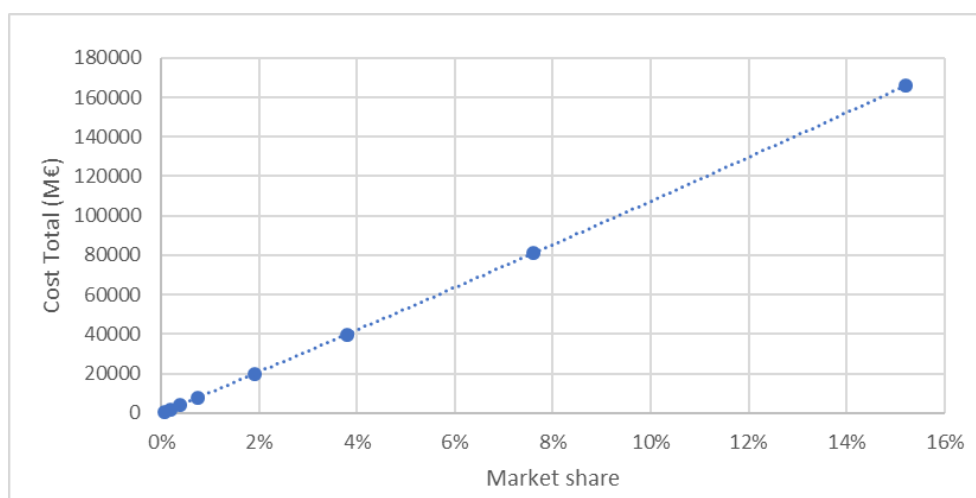


Figura 5.2. Evolució dels costos totals del sistema en base a la quota de mercat de l'agregador.

Per tal d'estudiar aquest efecte es presenten, en la Figura 5.3 i la Figura 5.4, la distribució dels diferents costos considerants dins l'optimització del cost total de l'Agregador per als casos amb menys i més nombre d'habitatges.

Una de les principals diferències és l'augment dels costos relatius a la fotovoltaica i les bateries. La suma dels costos d'inversió i manteniment d'aquestes dues tecnologies suposa un 20% dintre del conjunt de costos de l'Agregador de 40.000 habitatges, en enfront del 30% dins els costos de l'agregador de 8 milions d'habitatges.

Una segona diferència a ressaltar es troba en les fraccions del cost relacionades amb l'adquisició d'energia elèctrica de la xarxa: Transacció Elèctrica, Potència Elèctrica i Xarxa Elèctrica. Aquesta disminueix des del 41% en l'Agregador de 40.000 habitatges, fins al 32% de l'Agregador de 8 milions.

Si s'observa el cost total mig per client de cada cas, recollit en la Taula 5.3, s'evidencia com la instal·lació de més generació fotovoltaica i sistemes d'emmagatzematge no suposa un abaratiment del cost total per client, tot i l'estalvi aconseguit en els costos d'adquisició d'energia de la xarxa.

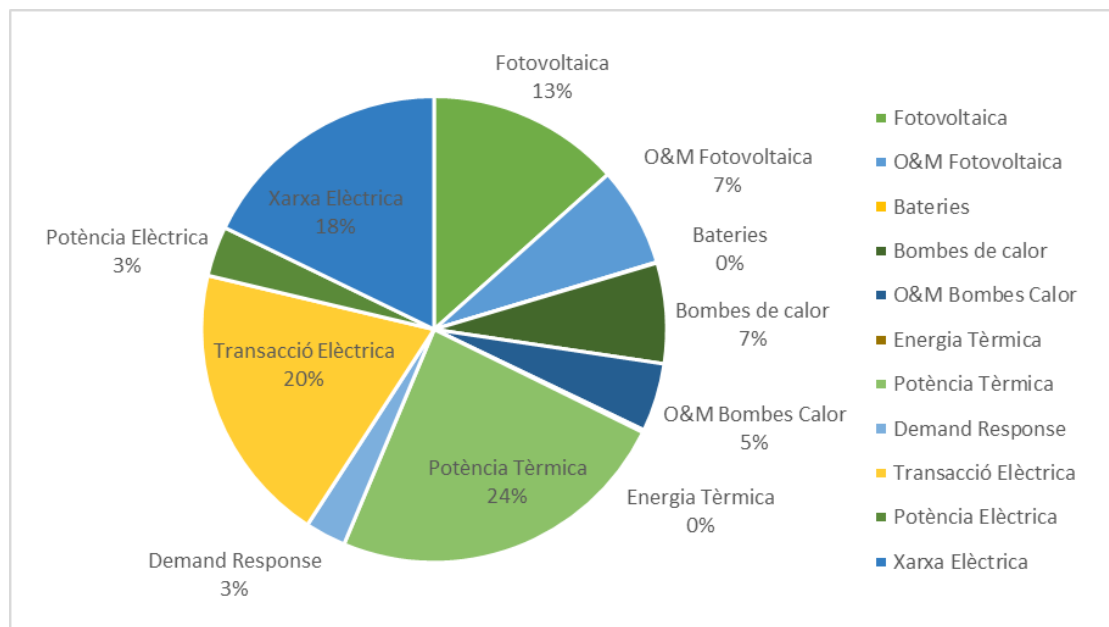


Figura 5.3. Distribució de Costos de l'Agregador de 0,04 M de clients.

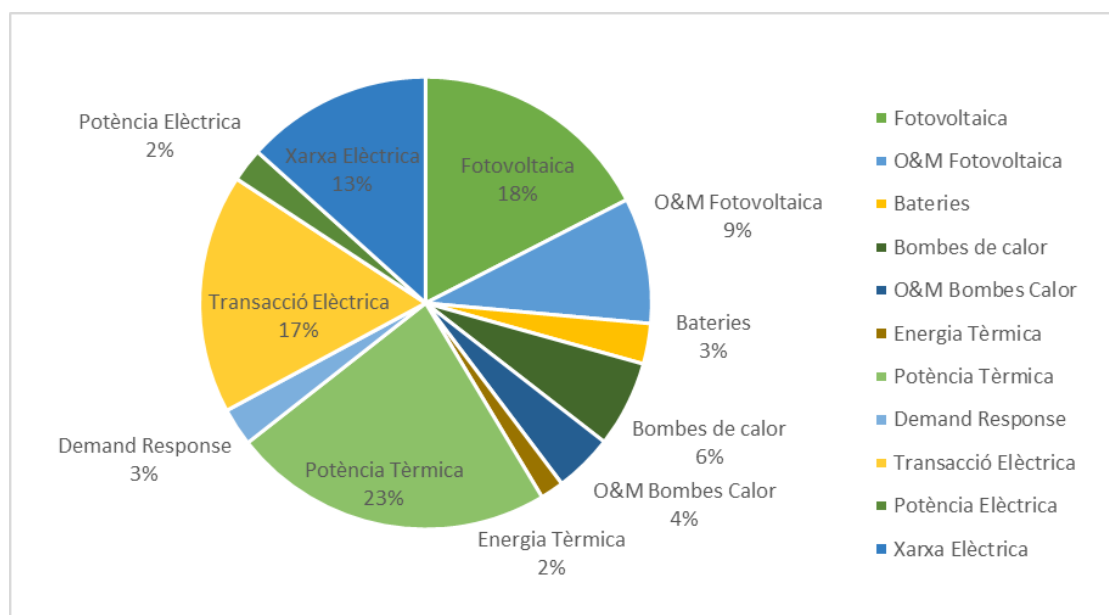


Figura 5.4. Distribució de Costos de l'Agregador de 8 M de clients.

5.1.2. Comparativa de costos amb un sistema energètic convencional.

Per tal de verificar els beneficis econòmics resultants de la implementació dels Agregadors sobre el cost final pel client es realitzen simulacions anàlogues a les de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts sense considerar l'aportació que les tecnologies no convencionals. És a dir, tan sols es considera l'aportació d'energia elèctrica de la xarxa i el consum de gas natural.

Taula 5.4. Comparatiu costos totals amb un sistema anàleg sense Recursos Energètics Distribuïts.

Nombre de clients	Cost per client - Sistema d'Agregador	Cost per client - Sistema Tradicional	Estalvi
0,04 M	19.853 €	24.621 €	4.768 €
0,1 M	19.853 €	24.621 €	4.768 €
0,2 M	19.853 €	24.621 €	4.768 €
0,4 M	19.853 €	24.621 €	4.768 €
1 M	19.853 €	24.621 €	4.768 €
2 M	19.946 €	24.665 €	4.718 €
4 M	20.269 €	24.954 €	4.685 €
8 M	20.737 €	25.524 €	4.787 €
Mitjana	20.027 €	24.781 €	4.754 €

Analitzant els resultats s'observa com la implementació de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts implica un estalvi mig superior als 4.750 € per habitatge.

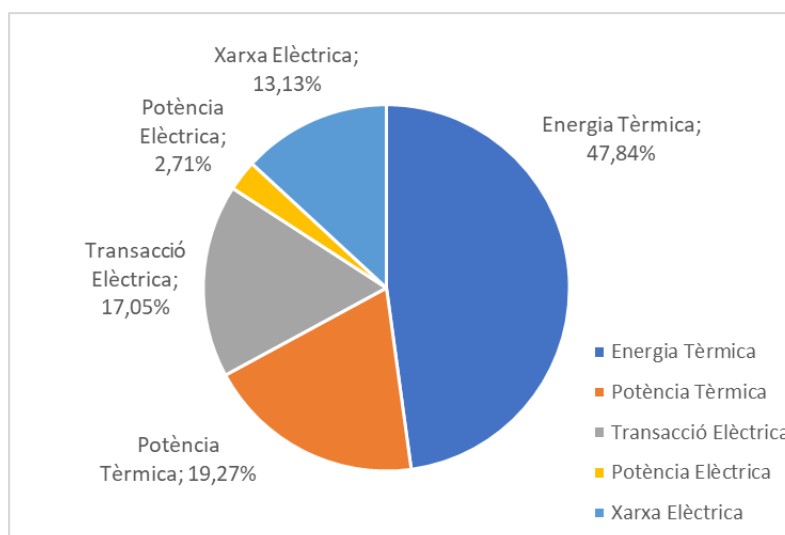


Figura 5.5. Distribució de Costos de l'Agregador sense Recursos Energètics Distribuïts.

5.2. Resultats en l'operació dels Recursos Energètics Distribuïts

Un cop analitzats els resultats generals de planificació i operació obtinguts amb l'execució del model, es planteja una anàlisi més específica de les diferents eines i tecnologies integrades en l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts.

5.2.1. Balanç d'energia elèctrica

Posteriorment a l'execució dels vuit casos del Model, s'han recollit per cada cas les dades corresponents als balanços elèctrics horaris de les 24 hores d'un dia, pels 12 dies representatius de l'any per cada tipus de client. És a dir, un total de 384 balanços energètics.

D'entre el gran nombre de dades recollides s'ha escollit una mostra de 4 balanços representatius, per tal d'analitzar l'equilibri elèctric dins dels sistemes proposats per a cada consumidor.

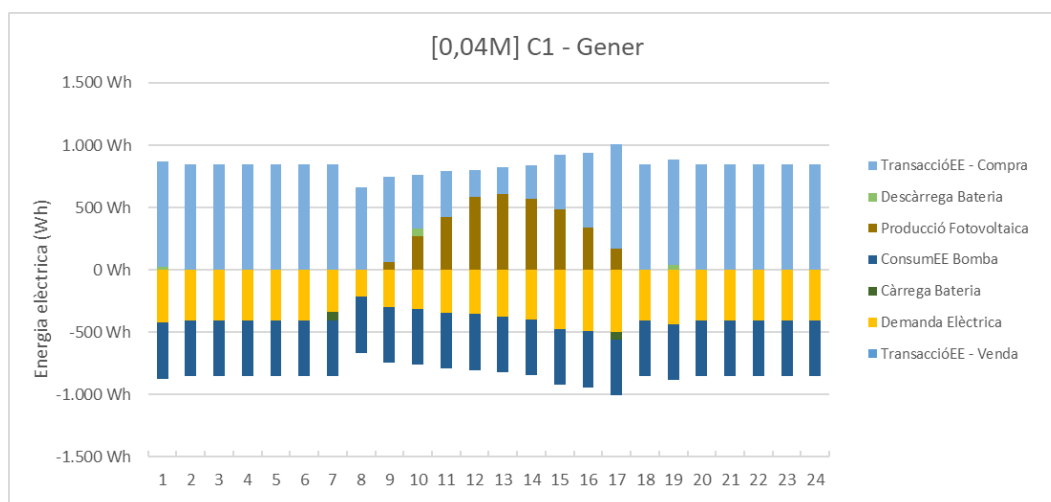


Figura 5.6. Balanç energia elèctrica per al client de tipus 1 el mes de Gener en l'Agregador de 0,04M.

De l'anàlisi dels balanços d'energia elèctrica es conclou que:

- La producció fotovoltaica, juntament amb la capacitat de gestió de la demanda, afecten directament sobre la forma del balanç energètic, sobretot en els mesos amb més producció.
- La compra d'energia elèctrica a la xarxa es redueix en gran mesura, gràcies a l'aportació del sistema fotovoltaic.
- Les bateries tenen un efecte gairebé inapreciable sobre la gestió diària de la demanda, a causa de les baixes capacitats instal·lades (Taula 5.2).
- El consum elèctric de la bomba es distribueix al llarg de les hores del dia.

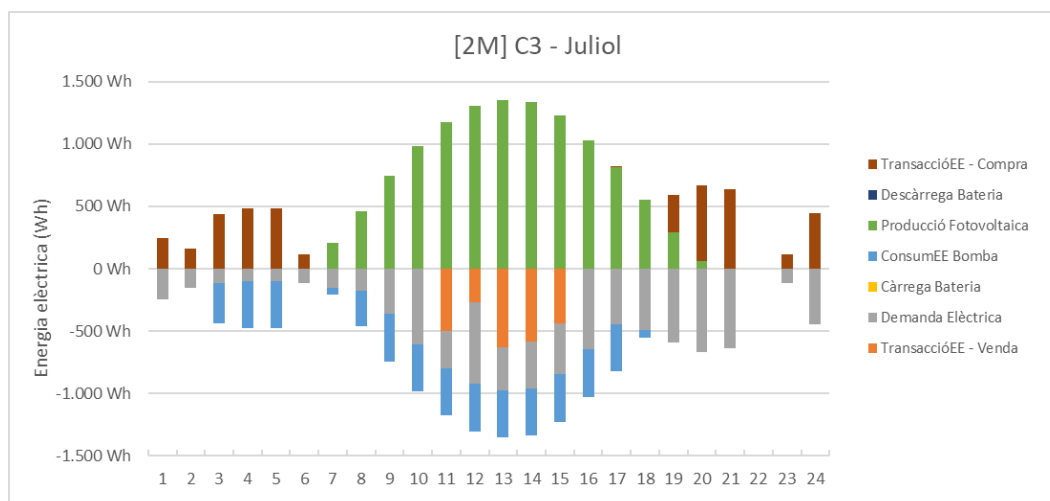


Figura 5.7. Balanç energia elèctrica per al client de tipus 3 el mes de Juliol en l'Agregador de 2M.

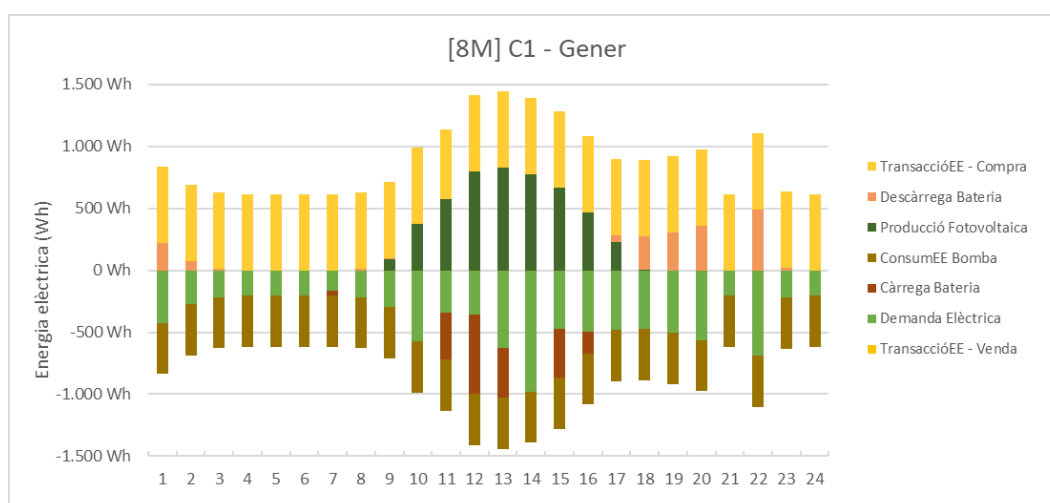


Figura 5.8. Balanç elèctric per al client de tipus 1 el mes de Gener en l'Agregador de 8M.

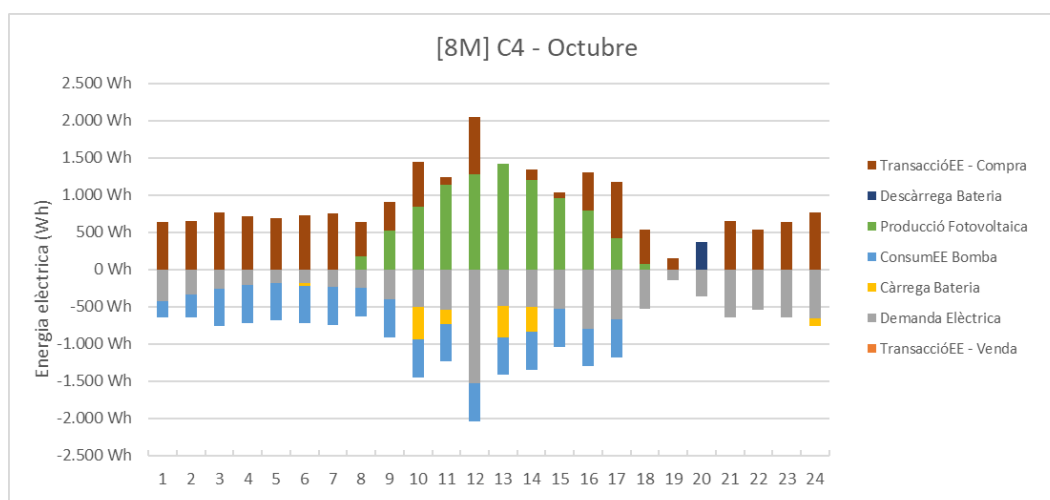


Figura 5.9. Balanç elèctric per al client de tipus 4 el mes d'Octubre en l'Agregador de 8M.

5.2.2. Balanç d'energia tèrmica

La demanda d'energia tèrmica del sistema es pot cobrir, o bé amb calderes de gas natural, o bé amb una bomba elèctrica de calor, tal com s'ha presentat en capítol 4.4.1 sobre el balanç tèrmic de les instal·lacions de l'Agregador.

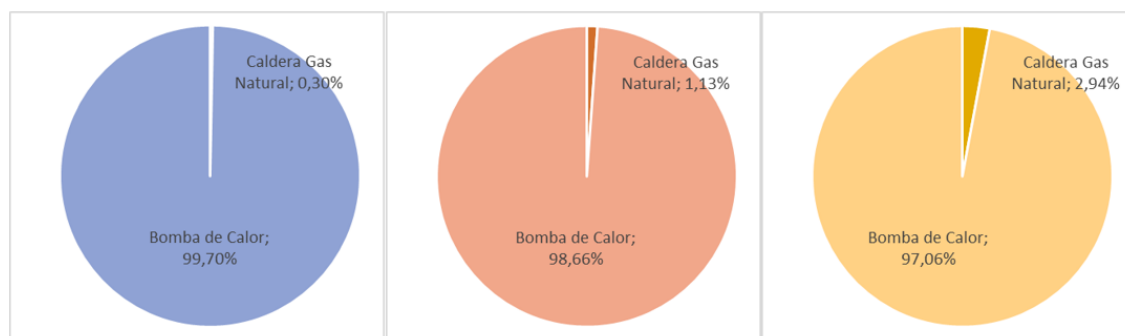


Figura 5.10. Distribució de la demanda d'energia tèrmica segons tecnologia en els Agregador de 0,04M, 2M i 8M, a esquerre, centre i dreta respectivament.

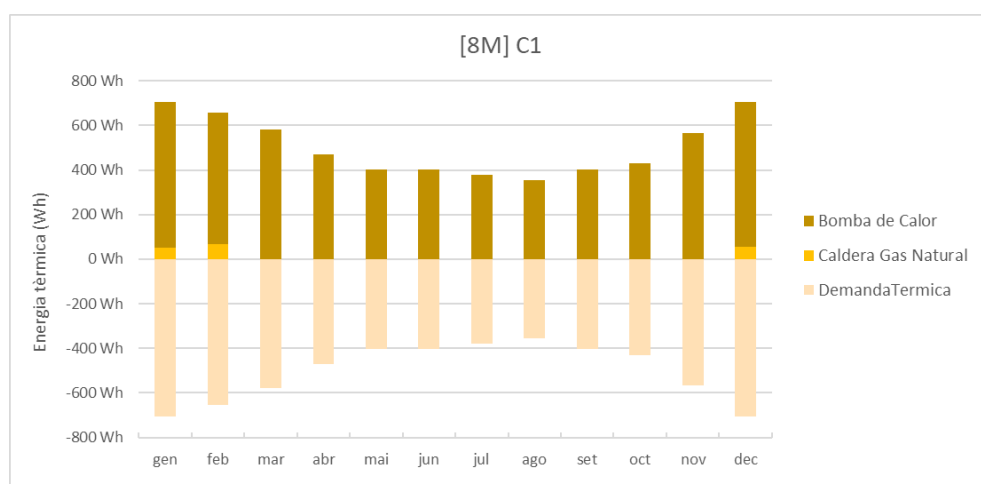


Figura 5.11. Balanç mensual d'energia tèrmica per al client de tipus 1 l'Agregador de 8M.

La demanda tèrmica es cobreix majoritàriament pel sistema de bombes de calor elèctriques, ja que és un sistema que ofereix una millor eficiència energètica i no està condicionat pels preus del gas natural.

Malgrat això, com més gran és l'Agregador modelitzat més gran és també l'aportació de les calderes de gas natural dins el balanç tèrmic dels consumidors. Tal com s'observa en la Figura 5.11, l'ús de la caldera de gas, per al client de tipus 1 dins l'Agregador de 8 milions d'habitatges, es concentra en els mesos de desembre, gener i febrer, on convergeixen una elevada demanda tèrmica amb una baixa producció fotovoltaica.

5.2.3. Emmagatzematge elèctric

Segons el que s'ha pogut analitzar tant en els resultats generals de la planificació i optimització de l'Agregador, com en els balanços d'energia elèctrica, el paper dels sistemes d'emmagatzematge amb bateries dins els casos plantejats és majoritàriament negligible.

Ara bé, s'ha cregut pertinent realitzar una petita anàlisi dels balanços interns de les bateries de majors capacitats instal·lades. En les figures següents es presenta el balanç energètic de la bateria del client de tipus 1 dins l'Agregador de 8 milions al llarg de l'any.

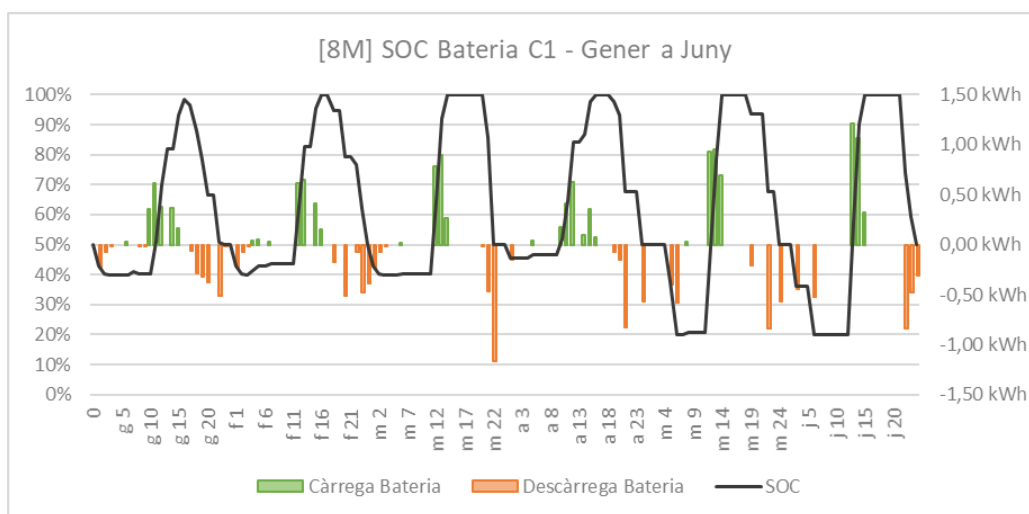


Figura 5.12. Balanç energètic bateries per al client de tipus 1 entre Gener i Juny en l'Agregador de 8M.

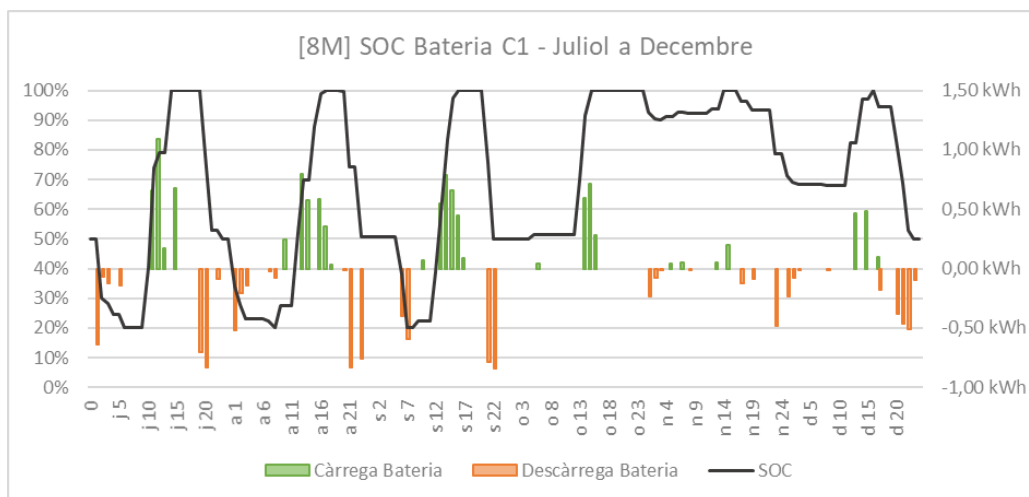


Figura 5.13. Balanç energètic bateries per al client de tipus 1 entre Gener i Juny en l'Agregador de 8M.

La càrrega de la bateria es concentra en les hores de producció solar, mentre que la descàrrega es concentra a les hores del vespre. És interessant senyalar que durant els mesos d'hivern l'estat de càrrega de la bateria no és mai inferior al 40% i que durant els darrers mesos de l'any la bateria es troba pràcticament inutilitzada.

5.2.4. Gestió de la Demanda

Per finalitzar, i com aspecte més rellevant dins l'anàlisi dels diferents recursos energètics proposats en el model, s'analitza la gestió de la demanda proposada pels diferents models d'optimització proposats.

Des del punt de vista dels beneficis per al consumidor, com a client dins el sistema de l'Agregador de Recursos Energètics Distribuïts, la gestió de la demanda permet:

- a) Suavitzar la corba de demanda, per evitar pics i valls de consum de potència.

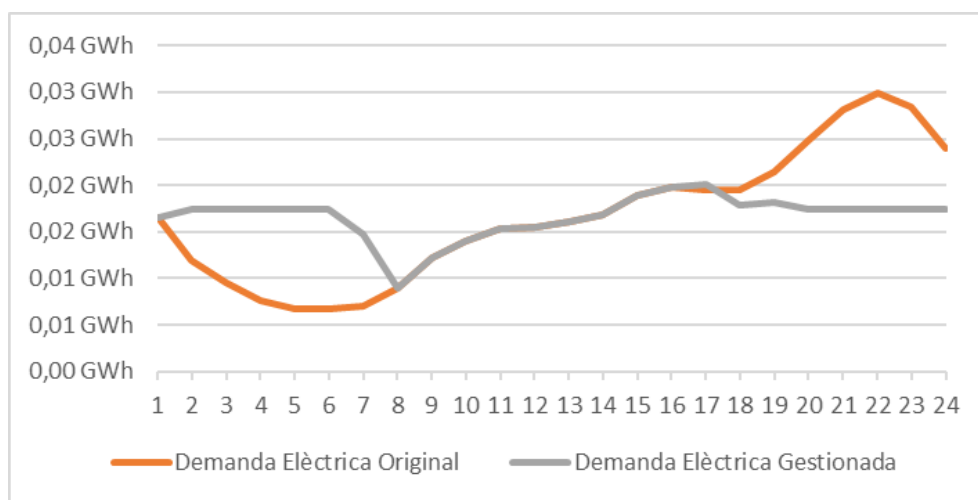


Figura 5.14. Gestió de la Demanda de Gener en l'Agregador de 0,04M.

- b) Adaptar la demanda a la producció fotovoltaica.

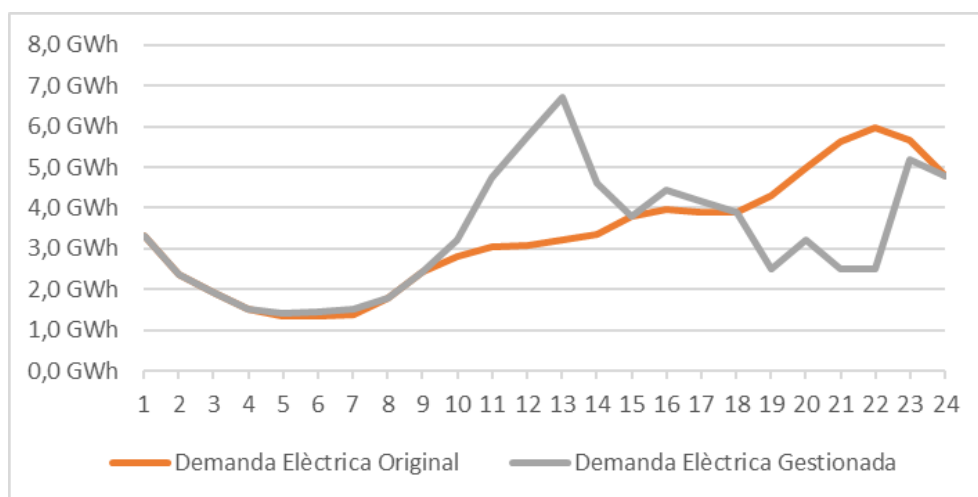


Figura 5.15. Gestió de la Demanda d'Octubre en l'Agregador de 8M.

c) Evitar el consum durant les hores amb els preus més elevats per l'energia.

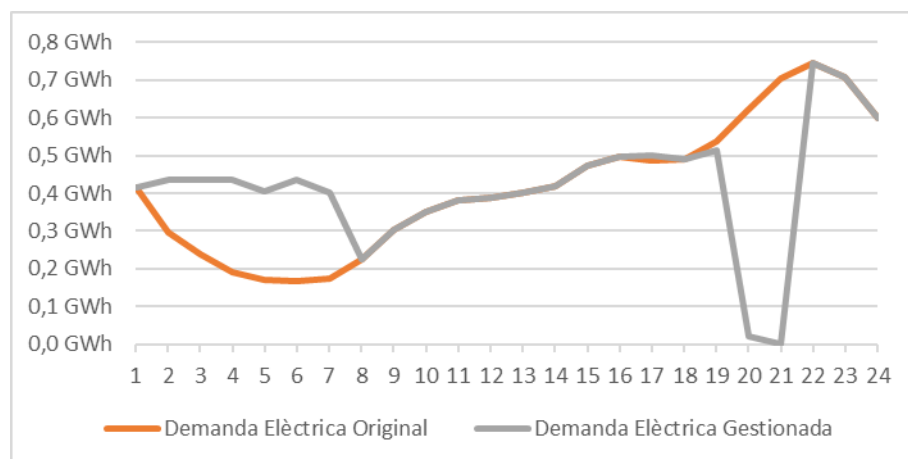


Figura 5.16. Gestió de la Demanda d'Octubre en l'Agregador de 1M.

Per altra banda, l'Agregador de Recursos compta amb una àmplia cartera de consumidors a la seva disposició, amb sistemes de producció fotovoltaica i eines de gestió de la demanda, per tal de presentar-se davant el Mercat com una única potència. En la es resumeix la capacitat d'ajust dels diferents Agregadors plantejats.

Taula 5.5. Capacitat d'ajust dels Agregadors.

Nombre de clients	Màxima variació de la Demanda dins un període de programació	Valor promig de l'agregació de la Demanda Mòbil
0,04 M	35,06 MWh	53,11 MWh
0,1 M	87,66 MWh	132,78 MWh
0,2 M	175,32 MWh	265,56 MWh
0,4 M	350,65 MWh	531,11 MWh
1 M	876,62 MWh	1.327,78 MWh
2 M	1.681,68 MWh	2.655,56 MWh
4 M	2.170,76 MWh	5.311,12 MWh
8 M	4.444,35 MWh	10.622,24 MWh

En la Figura 5.17, es mostra un exemple de la capacitat de gestió de l'Agregador. La gràfica mostra la variació de la demanda d'energia del conjunt de l'Agregador respecte a la demanda originalment introduïda en el model i corresponent al mateix Agregador.

Quan la gràfica pren valors positius (zona superior esquerra de la Figura 5.17) implica que el consum d'energia en aquells períodes de programació ha estat més elevat que la inicialment prevista. Per contra, en els períodes de programació en els quals la gràfica pren valors negatius (zona inferior dreta de la Figura 5.17) significa que la demanda ha disminuït respecte de la inicialment plantejada.

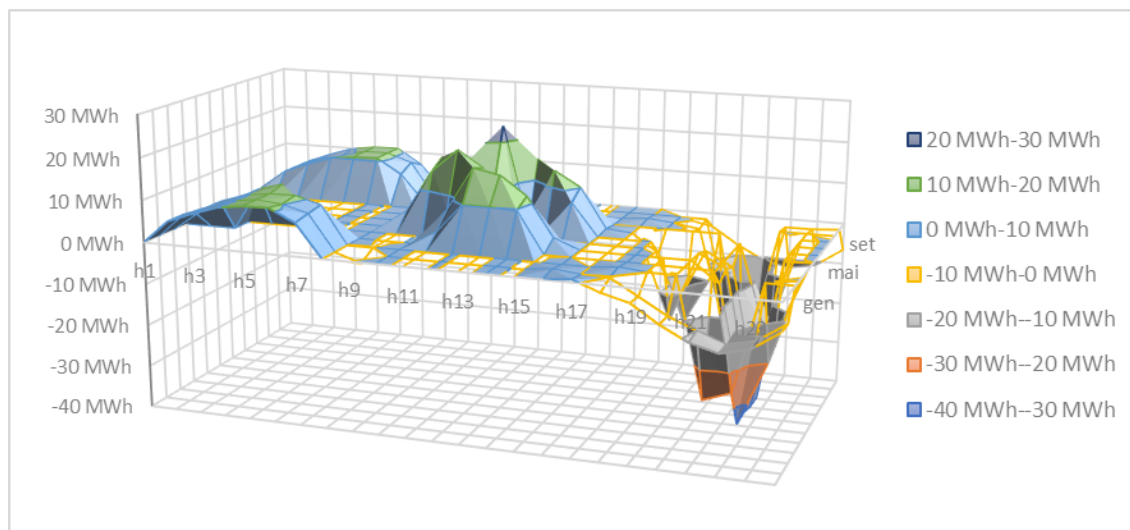


Figura 5.17. Variació de la Demanda original total en l'Agregador de 0,04M.

En els tres casos agafats com a exemple, corresponents als Agregadors de 40.000, 1 milió i 8 milions d'habitatges respectivament, s'observa com en les hores del vespre la demanda tendeix a disminuir respecte al valor originalment plantejat. Per contra, la demanda augmenta durant les hores nocturnes i centrals del dia. Aquesta compensació energètica és necessària per complir la restricció sobre la conservació de l'energia diària total consumida.

En els mesos de major producció fotovoltaica, l'augment en la demanda energètica es concentra principalment en les hores del migdia, per tal d'aprofitar la generació durant les hores de Sol.

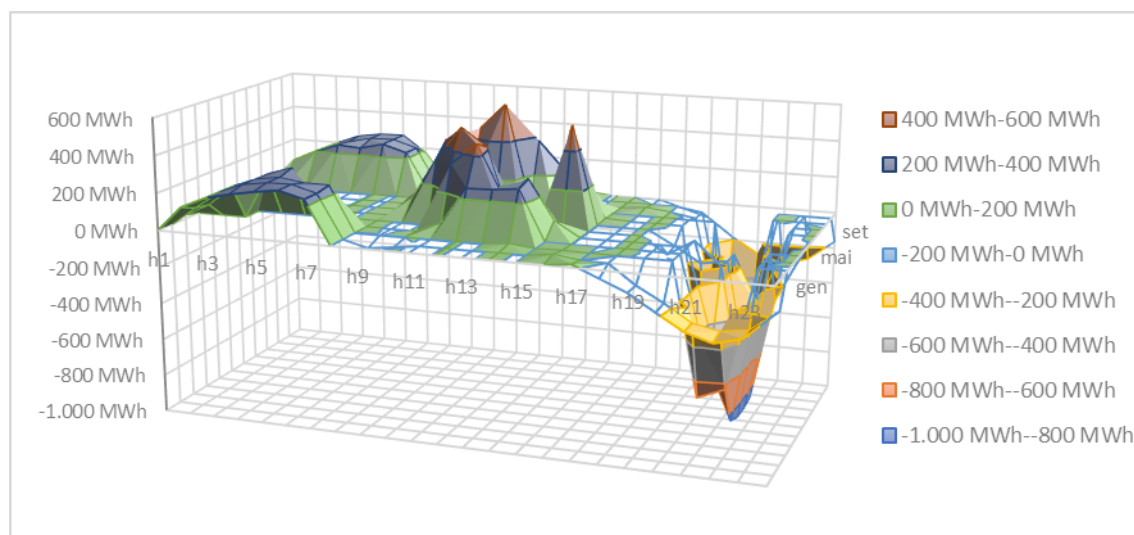


Figura 5.18 Variació de la Demanda original total en l'Agregador de 1M.

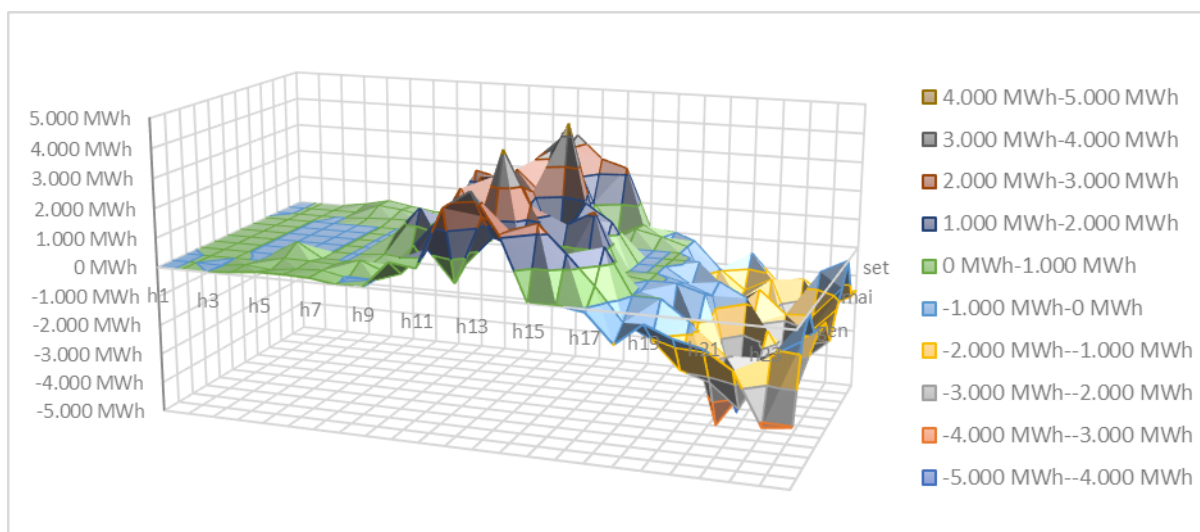


Figura 5.19. Variació de la Demanda original total en l'Agregador de 4M.

6. Anàlisi de l'impacte del projecte

L'impacte ambiental associat a l'*Optimització en la planificació i operació dels Agregadors de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el Mercat Elèctric* es podria considerar en essència negligible, ja que el projecte es basa en l'estudi d'un model matemàtic simulat dins d'una plataforma digital.

L'únic impacte, conseqüència de la pròpia realització del projecte, ha estat el consum associat a l'ús de l'ordinador portàtil personal.

La potència aproximada consumida pel dispositiu es considera propera als 110 W que, en el total de 600 hores de dedicació, impliquen un consum estimat de 66 kWh. Segons l'IDAE, el factor d'emissions [19] per a l'energia elèctrica de baixa tensió en el punt de consum és de 0,27 tCO₂/MWh final. Segons l'expressió (Eq. 6.1) l'emissió equivalent de CO₂ a l'atmosfera com a conseqüència de la realització del projecte ha estat de 17,82 kg.

$$66 \text{ kWh} \cdot \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}} \cdot \frac{0,27 \text{ tCO}_2}{1 \text{ MWh}} \cdot \frac{1000 \text{ kgCO}_2}{1 \text{ tCO}_2} = 17,82 \text{ kgCO}_2 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Altrament, tot i trobar-se fora de l'abast del projecte, es pot afirmar que la implementació de sistemes agregadors de recursos energètics distribuïts implicaria un impacte mediambiental, econòmic i social positiu, ja que l'Agregador participaria dins els mercats secundaris oferint una reducció de la demanda.

És complex quantificar quin seria el seu impacte real perquè la implementació massiva del model que es proposa suposaria un canvi transversal del model energètic tal com es coneix en l'actualitat.

L'estudi de l'impacte ambiental, social i econòmic de la implementació massiva de sistemes com els que es plantegen en aquest treball podria servir de base per a futures investigacions.

Convé remarcar però que, a grans trets, el sistema d'agregació de recursos energètics distribuïts plantejat sorgeix arran de la necessitat d'efectuar una transició energètica real, justa i transversal, basant-se en els pilars de l'eficiència, les energies renovables i la reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle, aspectes estretament relacionats amb la sostenibilitat i el baix impacte ambiental.

Conclusions

La definició i execució del model d'optimització en la planificació i operació d'agregadors de recursos energètics distribuïts amb participació en el mercat elèctric ha suposat la recopilació d'una gran quantitat d'informació, en forma de dades resultants dels diferents casos plantejats.

A tall de conclusió, es presenten les conclusions generals més importants extretes de l'anàlisi dels resultats obtinguts.

Pel que fa a l'anàlisi econòmic resultant de l'optimització del model, basat en la minimització de costos del sistema, es conclou que la implementació d'aquests tipus de sistemes suposa un estalvi directe i generalitzat en els costos totals dels clients de l'Agregador. La mitjana d'estalvi per client, respecte al mateix tipus de consumidors sense sistemes de recursos energètics distribuïts, és superior a 4.700 €.

Per altra banda, l'augment de la mida de l'Agregador no suposa una disminució en el cost per client. Aquest fet es justifica per la definició del model pel que fa al preu de l'energia.

L'augment de la mida de l'Agregador implica un augment de la demanda energètica sobre el sistema i per tant, considerant el funcionament de les corbes de demanda residual, un augment del preu de l'energia. Tal com està definit el model, l'augment del cost per més instal·lació de recursos energètics distribuïts no es veu compensat per una disminució del preu d'adquisició d'energia.

Una possible opció que afavoriria positivament sobre l'aportació dels Agregadors en el Sistema Elèctric, seria la modelització dels beneficis que aquest obtindria de la participació en els mercats secundaris de l'electricitat.

D'entre les tecnologies proposades destaquen l'aportació dels sistemes fotovoltaics, les bombes de calor i la gestió de la demanda. Per contra, l'aportació dels sistemes de bateries es pot considerar menyspreable. L'augment del nombre de recursos energètics dins el model implica un augment directe del nombre de variables de decisió, i en conseqüència un ventall més ampli de possibilitats d'optimització.

Per últim, pel que fa a l'efecte de la Gestió de la Demanda de l'Agregador, es conclou que la seva implementació suposaria un gran potencial d'ajust dins el Sistema Elèctric Espanyol.

Pressupost

En aquest apartat s'inclou el pressupost vinculat a la realització del Treball de Final de Grau: *Optimització en la planificació i operació dels Agregadors de Recursos Energètics Distribuïts amb participació en el Mercat Elèctric*.

Dins el pressupost s'han considerat els costos relatius als equips utilitzats, tant pel que fa al hardware com al software, els costos en els serveis indirectes necessaris per a la seva realització i els costos d'enginyeria.

Taula 7.1. Pressupost.

Concepte	Preu unitari	Unitats	Cost d'adquisició	Vida útil (mesos)	Temps d'ús	%	Cost Real
Ordinador	650 €/u	1	650 €	60	4	6,7%	42 €
Microsoft Windows	145 €/any	1	145 €	12	4	33,3%	48,3 €
Microsoft Office	99 €/any	1	99 €	12	4	33,3%	33 €
Connexió a internet	30 €/mes	4	-	-	4	-	120 €
Electricitat	0,12 €/kWh	66 *	-	-	-	-	7,9 €
Llicència AIMMS	0 €/u **	1	0 €	-	-	-	0 €
Enginyeria	8 €/h	600 h	4.800 €	-	-	-	4.800 €
TOTAL							5.051,2 €

(*) Considerant una potència de consum mig de l'ordinador portàtil de 0,11 kW i 600 hores de dedicació.

(**) Per a la realització del projecte s'ha utilitzat una llicència de desenvolupament acadèmic gratuïta.

En la Taula 7.2 s'especifica el desglossament dels costos pel concepte d'enginyeria, segons la dedicació a les diferents tasques.

Taula 7.2. Desglossament concepte d'Enginyeria.

Concepte	Preu unitari	Hores	Cost
Aprenentatge autònom	8 €/h	240	1.920 €
Reunions	8 €/h	10	80 €
Realització del projecte	8 €/h	350	2.800 €
TOTAL		600	4.800 €

Bibliografia

1. Consejo de Ministros. Anteproyecto de Ley de Cambio Climático. A: [en línea]. 2019. [Consulta: 20 maig 2019]. Disponible a: <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/220219-proyecto.aspx>.
2. Estado, J.D.E.L. *Acuerdo de París contra el cambio climático*. 2017. 2017.
3. Calvillo, C.F. et al. Optimal planning and operation of aggregated distributed energy resources with market participation. A: *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 2016, Vol. 182, p. 340-357. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.08.117.
4. Guirado Torres, R. et al. El Sistema Eléctrico. A: *Tecnología Eléctrica* [en línea]. McGraw-Hill, 2006, ISBN 844814807X. [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible a: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/844814807X.pdf>.
5. Dirección de Comunicación y RR.II. de RED ELÉCTRICA. El Marco Legal Estable. A: [en línea]. Alcobendas: [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible a: <https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/marcolegalestable.pdf>.
6. López de Castro García-Morato, L. La nueva Ley 54/1997, del Sector Eléctrico. A: [en línea]. Madrid: 1999. [Consulta: 4 abril 2019]. Disponible a: http://afduam.es/wp-content/uploads/pdf/3/PostScript/anuario16_p241.pdf.
7. Estado, J. del. *Ley del Sector Eléctrico 24/2013, de 26 diciembre*. 2014. España: 2014.
8. Red Eléctrica de Espanya. A: [en línea]. [Consulta: 30 maig 2019]. Disponible a: <https://www.ree.es/es>.
9. Distribuidora de luz. ¿Cuál me corresponde? A: *Blog Esfera Luz* [en línea]. 2018. [Consulta: 5 abril 2019]. Disponible a: <https://www.esferaluz.es/blog/sector/distribuidora-de-luz/>.
10. Estado, J. del. *Real Decreto Ley núm. 15/2018, de 5 de octubre*. 2018. 2018.
11. Estado, J. del. *Real Decreto Ley núm. 244/2019, de 5 de abril*. 2019. 2019.
12. Cheng, Z., Duan, J. i Chow, M.-Y. To Centralize or to Distribute: That is the question. A: *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2018, Vol. March.
13. Kato, T., Yuasa, K. i Matsuyama, T. Energy on demand: Efficient and versatile energy control system for home energy management. A: *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm 2011*. IEEE, 2011, p. 392-397. DOI 10.1109/SmartGridComm.2011.6102354.
14. Díaz, T. El Gobierno regula un nuevo agente en el mercado para permitir un ahorro hasta del 15% en electricidad. A: *elEconomista.es* [en línea]. 14 diciembre 2018, [Consulta: 3 maig 2019]. Disponible a: <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/9582499/12/18/El-Gobierno-regula-la-agregacion-de-demanda-para-permitir-un-ahorro-hasta-del-15-en-electricidad.html>.
15. AIMMS - Product Overview. A: [en línea]. [Consulta: 1 maig 2019]. Disponible a:

<https://aimms.com/english/developers/product-info/>.

16. AIMMS Documentation. A: [en línia]. [Consulta: 1 maig 2019]. Disponible a: <https://manual.aimms.com/rlink/>.

17. Roelofs, M. i Bisschop, J. *AIMMS - The Language Reference*. 2018. AIMMS,2018.

18. Commission, E. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). A: [en línia]. [Consulta: 11 abril 2019]. Disponible a: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#DR.

19. Secretaría General. Departamento de Planificación y Estudios. *Factores de Conversión Energía Final - Energía Primaria y Factores de Emisión de CO2* [en línia]. 2010. IDAE,2010. [Consulta: 25 maig 2019]. Disponible a: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_de_Conversion_Energia_y_CO2_\(2010\)_931cce1e.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_de_Conversion_Energia_y_CO2_(2010)_931cce1e.pdf).

Annex A. Dades d'entrada del Model

En la taula següent es resumeixen les principals dades d'entrada del model d'optimització de l'Agregador de recursos energètics distribuïts amb participació en el mercat elèctric.

CONCEPTE	VALOR
Vida Útil	20 anys
Preu Inversió Fotovoltaica	1.200.000 €/MW
Preu O&M Fotovoltaica	30.930 €/MW
Preu Inversió Bateria	180.000 €/MWh
Preu Inversió Bomba de Calor	2.940.000 €/MW
Preu O&M Bomba de Calor	100.100 €/MW
Preu equip Gestió de Demanda	250 €
Tarifa Accés Potència Elèctrica	38.043 €/MW
Tarifa Accés Potència Tèrmica	106,08 €/client
Preu Xarxa Elèctrica	44,02 €/MWh
Preu Base Energia Tèrmica	74,3 €/MWh
Pèrdues Fotovoltaica	24,0%
COP	2,50
Pèrdues Bomba de Calor	15,0%
Rendiment Bateria	95,0%
SOC Inicial Bateria	50,0%
Demanda Mòbil màxima	13,3%

A continuació s'adjunten les dades d'Irradiància Solar de referència, en W/m².

.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
gen	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	41,1	168,0	261,4	361,5	375,9	352,8	300,9	212,7	103,4	0,3	0,0	0,0	0	0	0	0
feb	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,1	102,5	222,7	330,0	398,8	443,8	414,8	375,8	277,0	173,3	50,3	0,0	0,0	0	0	0	0
mar	0	0	0	0	0	0,0	0,0	61,5	214,4	325,6	382,2	473,4	504,2	492,1	426,5	322,8	211,5	115,6	5,4	0,0	0	0	0	0
abr	0	0	0	0	0	0,0	39,3	194,4	312,1	406,9	528,8	636,8	653,5	700,1	547,6	467,5	341,1	199,6	63,8	0,0	0	0	0	0
mai	0	0	0	0	0	1,3	133,8	288,7	447,5	581,5	684,3	778,5	804,5	710,3	619,7	589,1	434,2	263,3	126,2	4,9	0	0	0	0
jun	0	0	0	0	0	23,4	166,9	339,7	512,9	683,8	786,7	841,7	930,5	874,8	833,8	715,5	537,4	377,4	176,5	40,0	0	0	0	0
jul	0	0	0	0	0	1,0	147,7	332,9	537,9	713,4	853,0	946,5	981,4	969,7	891,0	743,3	589,4	399,0	210,1	41,6	0	0	0	0
ago	0	0	0	0	0	0,0	70,2	242,3	431,6	610,4	770,0	839,5	880,5	837,3	731,5	605,6	449,5	272,3	110,2	0,2	0	0	0	0
set	0	0	0	0	0	0,0	11,1	167,7	347,9	496,0	616,7	730,5	726,6	682,7	624,7	475,7	312,6	156,5	13,9	0,0	0	0	0	0
oct	0	0	0	0	0	0,0	0,0	66,8	195,4	315,0	427,6	481,2	533,7	449,5	361,7	296,5	157,2	26,7	0,0	0,0	0	0	0	0
nov	0	0	0	0	0	0,0	0,0	1,9	101,7	225,0	334,0	371,0	399,6	386,8	296,2	189,6	74,1	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
dec	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	55,2	168,5	273,2	357,7	347,3	319,5	245,5	176,5	52,2	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0